

木材の乾燥機構に関する研究

第5報 木材水分の擴散係數と含水率の關係

Takeo OGURA: Studies on the mechanisms of drying of wood.

5. Relation between the diffusion coefficient and the moisture content of wood.

農林技官 小 倉 武 夫

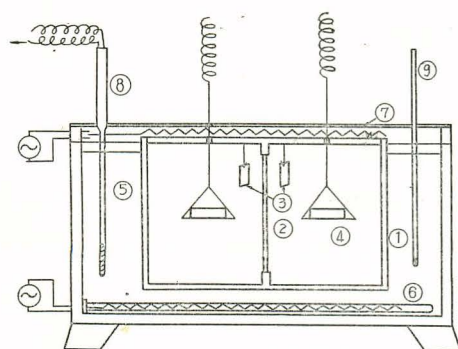
I ま え が き

この研究の第2報において拡散係數 λ (g/cm. h. %) を Egner 法によつて求めたが、 λ は含水率と無關係になるという結果を得た。しかし多くの研究によると λ は多かれ少なかれ含水率によつて変化するものといわれているが、その多くは乾燥経過を測定してこれから λ を求めており、 λ の値を直接測定したのは Martley⁽⁵⁾以外にないようである。従つて実際に水分が木材を常に通過するような特殊な実験装置を用いて数段階の含水率における水分移動量を実測して拡散係數を計算し、含水率との關係を求め、これに対する考察を加えてみた。

この実験は凡て助手梅原誠君を煩わしたもので、労を謝すと共に、終始御援助をたまわつた齊藤木材部長に感謝の意を表す。

II 実 験 法

木材を通過する水分量を直接測定するには、ある密閉空間を木材で遮断し、各室内を夫々異なる一定蒸気圧に保たせると、蒸気圧差にもとづき木材を透つて水分が移動するので、この移動量を測定するのが適當であると思ひ、この考え方に相応する実験装置を用いた。Fig. 1 は



- ① Box for measurement of diffusion.
- ② Test piece.
- ③ Piece for measurement of equilibrium moisture content.
- ④ Vessel of salt.
- ⑤ Thermo-bath.
- ⑥ Heater.
- ⑦ Heater in cover to prevent condensation.
- ⑧ Regulator for temperature.
- ⑨ Standard thermometer.

Fig. 1. Equipment for experiment.

この概略である。寸法 $27 \times 19 \times 19$ (cm) の眞鍮製容器の中央を試験片で仕切り、両室内に一定の蒸気圧を保たせるため適当な塩類をスプリングバランスに吊したガラス容器にいれ、温度を一定に保持するため容器全体を恒温槽にしづめたものである。

塩類によつて蒸気圧を一定にたもたせるには、完全に密閉すべきであるが、その塩類の重量変化を測定するにはスプリングバランスによるほかないので、ガラス容器を吊す針金を通す小穴 (径 1.5 mm) を蓋にあけた。このため容器内を塩類の示すべき蒸気圧に保つことは困難であり、その圧力を直接測定することも出来ない。そこで木材の小片 (寸法 $2.0 \times 3.0 \times 0.2$ cm) を容器内につるし、これが容器中の蒸気圧と平衡をたもっているものとして実験終了後小片の含水率を測定し、その含水率及び温度に対する蒸気圧を木材の恒温吸着曲線から求めて容器中の蒸気圧と見做した。

供試片を移動した水分量は蒸気圧の高い容器中にある塩類の減少量か、または低い方の塩類の増加量かであつて、数時間毎に重量変化を測定し、これを数日間継続して、重量変化と時間との関係を図上にえがき、この関係が直線的で、しかも重量の増加経過と減少経過との相等しいもののみをとり、この直線から単位時間当りの変化重量を求め、これをもつて水分移動量とした。しかし前述の蓋にあけた小穴から蒸気は放散又は吸入されるので、容器中塩類の変化量が凡て試験片を通つて移動した蒸気量とは認められず、これらの放散、あるいは吸入した量、即ち損失量が含まれていると見るべきである。従つてあらかじめ試験片のかわりに蒸気を全く透させない金属板を用い、このときの塩類変化量を測定しておき、これを損失量として塩類重量変化量からのぞいた値をもつて水分移動量とした。

次に試験片の含水率と移動量との関係については、任意の含水率において移動量を求めることは出来ないが、用いた塩類の組合せによつていろいろの含水率における移動量を求めてこれらの関係を見出した。用いた塩類を蒸気圧の高いものから順にならべると次の如くである。

H_2O , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, KBr , MgCl_2 , CaCl_2 , KOH .

尙実験に用いた樹種はヒノキ、板目で、その寸法は $10.5 \times 10.5 \times 0.25$ (cm) である。

Ⅲ 実験結果と考察

実験結果

金属板で容器を仕切つたときの塩類の重量変化量 (損失量) は用いる塩類の種類と外周条件によつてことなるので、実験の都度これを測定してその数値を求めた。

次に木材で仕切つたときの塩類重量の変化量経過はもとより用いた塩類の組合せによつてことなる。この塩類の組合せについては凡ゆる場合を実施したが、蒸気圧差の程度によつて塩類の増加量と減少量とが等しくならないものもあつたので、実験結果としてはこの両者の等しくなつた組合せのみをとりあげた。その塩類の組合せは H_2O と KBr ; $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ と KBr ;

KBr と $MgCl_2$; $MgCl_2$ と $CaCl_2$; 及び $MgCl_2$ と KOH であり, このときの試験片の平均含水率は夫々約 16%, 14.5%, 9.0%, 8.5% 及び 4.0% 程度であつたが, とくに繊維飽和点附近の結果がえられなかつたのは残念であつた。この塩類重量変化の代表的なもののみを Fig. 2 に示した。

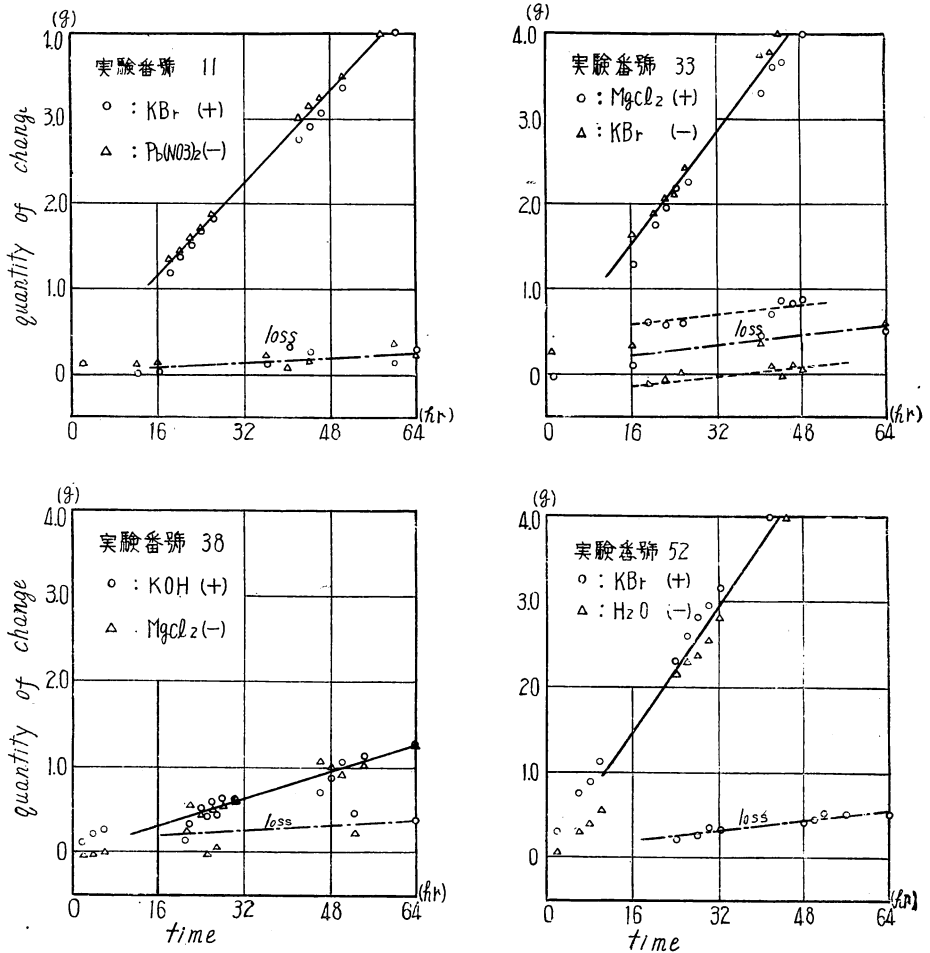


Fig. 2. Course of increase or decrease of salt.

拡散係数は水分移動量 q , 水分傾斜 du/dx 又は蒸気圧傾斜 dp/dx を知るときは次式で示されるので,

$$q = -\lambda_u \frac{du}{dx} \cdot A$$

$$\text{又は } q = -\lambda_p \frac{dp}{dx} \cdot A$$

実験で求めた移動量からこの式によつて拡散係数 λ_u , λ_p を計算することができる。測定値と拡散係数とを一括して Table 1, 2. に示した。更に λ_u , λ_p と含水率の関係は Fig. 3, 4 の如くである。

Table 1.

No.	Thickness of test piece cm	Adsorption side			Desorption side		
		Salt	Equilibrium moisture content %	Vapor pressure mmHg	Salt	Equilibrium moisture content %	Vapor pressure mmHg
47	0.253	KBr	13.96	71.65	H ₂ O	18.44	78.73
48	0.251	"	13.61	70.74	"	18.63	78.73
51	0.257	"	13.77	71.54	"	18.35	79.86
52	0.251	"	15.26	75.65	"	19.72	82.57
11	0.25	KBr	13.06	67.23	Pb(NO ₃) ₂	15.73	72.40
12	0.249	"	12.91	66.35	"	15.08	71.10
13	0.251	"	12.93	66.35	"	15.75	71.97
14	0.255	"	12.30	65.02	"	16.53	74.14
15	0.250	"	13.98	69.88	"	16.77	74.14
32	0.250	MgCl ₂	6.91	36.26	KBr	11.72	62.81
33	0.251	"	6.30	33.17	"	10.76	58.83
34	0.245	"	6.93	36.71	"	12.50	65.46
22	0.251	CaCl ₂	6.30	33.78	MgCl ₂	10.86	58.97
24	0.248	"	6.55	34.67	"	11.03	59.41
36	0.244	KOH	2.93	13.14	MgCl ₂	6.32	31.39
37	0.244	"	2.52	10.95	"	5.19	23.89
38	0.251	"	2.03	8.32	"	5.17	23.86
39	0.251	"	2.49	10.95	"	6.33	30.97
40	0.250	"	3.89	17.95	"	6.31	30.97

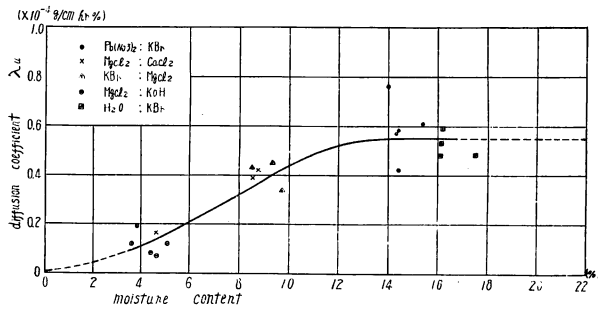


Fig. 3. Relation between diffusion coefficient λ_u and moisture content.

考案

この実験によつて求めた拡散係数の値は含水率13%以上では $0.5 \times 10^{-4} \text{g/cm.h.}\%$ であつて、前に報告した Egner⁽¹⁾, Schlüter & Fessel⁽¹⁰⁾, Martley⁽⁵⁾ 等の値にくらべて夫々の実験条件(主として温度, 樹種等)を考慮しても多少の相異はまぬかれぬが、大体

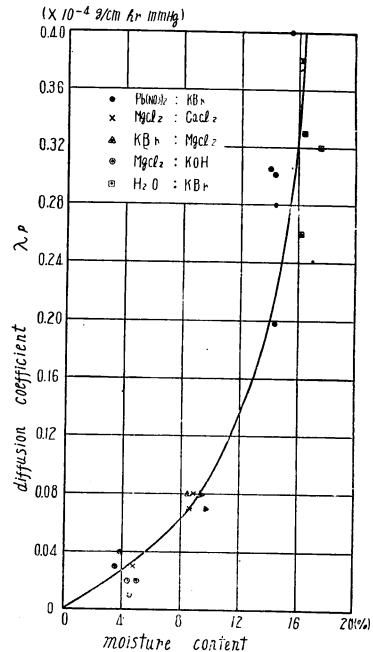


Fig. 4. Relation between diffusion coefficient λ_p and moisture content.

Table 2.

Moisture quantity moving through the test piece		Difference of moisture content %	Difference of vapor pressure mmHg	Diffusion coefficient		Average moisture content %
g	(loss)			g/cm.h.%	g/cm.h.mm Hg	
0.104	0.00	4.48	7.08	0.59×10^{-4}	0.38×10^{-4}	16.2
0.104	0.00	5.02	7.99	0.53	0.38	16.1
0.090	0.0075	4.58	8.32	0.48	0.26	16.1
0.0925	0.0075	4.46	6.92	0.48	0.31	17.5
0.062	0.005	2.67	5.17	0.58	0.30	14.4
0.071	0.005	2.17	4.75	0.76	0.35	14.0
0.0685	0.005	2.82	5.62	0.57	0.28	14.3
0.068	0.00	4.23	9.12	0.42	0.19	14.4
0.0675	0.00	2.79	4.26	0.61	0.40	15.3
0.095	0.0075	4.81	26.55	0.45	0.08	6.3
0.084	0.0075	4.46	25.66	0.43	0.08	8.5
0.085	0.0075	5.57	28.75	0.34	0.07	9.7
0.079	0.008	4.56	25.19	0.39	0.07	8.6
0.085	0.008	4.48	24.74	0.42	0.08	8.8
0.014	0.004	3.39	18.25	0.07	0.01	4.6
0.025	0.004	2.67	12.91	0.19	0.04	3.8
0.020	0.004	3.14	15.53	0.12	0.03	3.6
0.017	0.004	3.84	20.02	0.08	0.02	4.4
0.016	0.004	2.42	13.02	0.12	0.02	5.1

類似の値であり、Egner 方法によつて水分分布状態から求めた数値⁽⁷⁾ともほぼ類似している。

亦 Stamm が計算によつてもとめた水分伝導度 (Average transvers drying diffusion constant) (50°C , $r=0.365$) は $0.6 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{sec}$ で、これを拡散係数 λ に換算すると $\lambda = 0.78 \times 10^{-4} \text{g/cm.h.}\%$ となり、Stamm の計算式に対し批判的立場をとつた Kröll⁽⁴⁾ の移動係数 (Bewegungsbeiwert) は $0.1 \sim 0.15 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{h}$ (50°C , $u=15 \sim 20\%$, $r=0.365$) で、 $\lambda = 0.35 \sim 0.52 \times 10^{-4} \text{g/cm.h.}\%$ となり、何れも実験値とほぼ同じ値である。更にすでに報告した各樹種の水分伝導係数 $K^{(8)}$ のうち $r=0.35$ に対する値は $K = 20 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{h}$ で、同様にして $\lambda = 0.70 \times 10^{-4} \text{g/cm.h.}\%$ となり、やはり λ の実験値とほぼ一致している値をえた。このように本実験で求めた数値は既往の実験値ならびに計算値にくらべ近似的であり、まず妥当な値といふことができる。

次に λ_u と含水率との関係については Fig. 3 に示したごとく含水率 8~10% 迄は明らかに増加を示しているが、含水率 14~18% の範囲ではほとんど同じ値とみとめられ、而もその数値は前者に比して僅かに増加しているにすぎない。従つて同図に示したように含水率 12~13% の附近に変曲点があるのではないかと思はれる。更に高含水率における実験が行はれな

かつたので確定的なことはいえないが、木材の水分含有状態から推測して繊維飽和点附近までは同じ値ではないかと思はれるので点線で示しておいた。

木材中の水分の含まれ方は多くの学者によつて研究されてきたが、一般に認められているのはその含まれ方によつて化学収着、吸着及び毛細管凝結に区分されているが、これらは互に除々に移行しているのだからこれらの間に確然とした境界をみとめることはできないようである。水分の含まれ方は木材—水蒸気の等温吸着曲線の変曲点によつて区分されるという説が多いが、これによつてもその区分がいかにか明らかなか想像できる。

今問題にしているのは吸着と毛細管凝結とであるが、吸着を示す含水率については Emmett & Brunauer⁽²⁾ はセルローズでは 3~10% (表面結合水), Sheppard⁽¹¹⁾ は約 8%, 小栗⁽⁹⁾ はセルローズでは 1 mol 附近 (約 11.1%), 更に Kollmann⁽³⁾ は 7, 8% より 15% までとしている、従つてこれ以上は毛細管凝結になるが、このように研究者によつて区々である。

これらを総合すると含水率 14~15% 以上では常に毛細管凝縮であることは一致している。従つて Fig. 3 の如く λ_u の一定になるのは毛細管凝縮の範囲ということになる。いゝかえると内部構造の毛細管壁 (ミセル間隙) が少くも単分子層の水分で完全におよばれていたら水分の移動に対する抵抗 (拡散係数の逆数的な意味であるが) は同じであることになる。

このような考え方は決して矛盾したものでなく、たゞ実験が繊維飽和点附近において行われなかつたので証明はできなかつたのであるが、拡散係数は 14~15% 以上繊維飽和点までは含水率には無関係なものといつて差支えなからう。

実際に乾燥を行うのは含水率 10% 程度までであり、しかも近似的な解をえればよいことが多いので、実用的には $K = \frac{100 \cdot \lambda_u}{r_0}$ の関係⁽⁷⁾ において λ_u を一定とみなして差支えないと思われる。

引用文献

1. Egner K.: Beiträge zur Kenntnis der Feuchtigkeitsbewegung in Hölzern, vor allem in Fichten Holz während der Trocknung unterhalb des Fasersättigungspunktes. Forschungsberichte Holz, Heft 2 1934.
2. Emmett P. H & Brunauer S.: J. Am. Chem. Soc. 59 1937.
3. Kollmann F.: Sorption und Quellung des Holzes. Die Naturwissenschaften Heft 14/26 1944.
4. Kröll K.: Die Bewegung der Feuchtigkeit in Nadelholz während der Trocknung bei Temperaturen um 100°. Holz als Roh- und Werkstoff. Heft 5 1951.
5. Martley J. F.: Moisture movement through wood, The steady state. Dept. Sci. and Ind. Res. F. P. R. Tech. Pap. No. 2 1926.
6. 宮部宏: 材料の湿气的性能 早大理工学研究所報告, 第1輯 昭和 19 年。
7. 小倉武夫: 木材の乾燥機構に関する研究 第2報 水分伝導と拡散係数について 林業試験場研究報告 第 45 号 1950.

8. 小倉武夫: 水分伝導度と比重の関係について 日本林学会誌 第33巻第12号 昭和26年
9. 小栗捨蔵: 繊維素の吸湿について 第10報 真空中における吸湿の速度について 工業化学会雑誌 35編 昭和7年
10. Schlüter R. und Fessel F.: Neue praktische Erfahrungen bei der künstlichen Holz Trocknung, Trockentechnik. Holz als Roh- und Werkstoff. Heft 5, 1939.
11. Sheppard S. E.: Tran, Faraday Soc. 29, 1933.
12. Stamm A. J.: Passage of liquids, vapors and dissolved materials through softwoods. U. S. Dept. Agr. Tech. Bul. No. 929 1946.
13. Weise.: Wood chemistry 1946.

Résumé

This experiment was conducted to determine the relation of diffusion coefficient with moisture content. The moisture quantity moving through the test piece (size: $10.5 \times 10.5 \times 0.25$ cm), which is held separating the box secured in a thermo-bath, was measured by the change of weight of salts in the vessel by spring balance suspended in each separated cell, as shown in Fig. 1.

The combinations of salts used in this experiment were H_2O and KBr, $Pb(NO_3)_2$ and KBr, KBr and $MgCl_2$, $MgCl_2$ and $CaCl_2$, $MgCl_2$ and KOH and the mean moisture content of test piece corresponding to these salts was found to be about 16, 14.5, 9.0, 8.5 and 4.0% respectively.

The values measured in this experiment and the diffusion coefficients λ calculated are shown in Table 1, 2, the relations of λ with moisture content are shown in Fig. 3, 4. The values of λ obtained in this experiment are approximately equal to those obtained by Egner, Schlüter, Martley, and to those calculated by Stamm, Kröll. In the relation between λ and moisture content, the value of λ undoubtedly increased with moisture content below 8–10%, seemed to be about the same at 14–18%, and to have an inflection point near 12–13%. Considering the ways in which water is held in cells of wood, water seems to be held by chemisorption and adsorption below 14–15%, and by capillary condensation above this moisture content.

As water is monomolecularly held in capillary condensation, it may be understood that the capillary moisture moved in regardless of moisture contents above this. Accordingly, the moisture movement approximately coincides when the moisture content is above 10% to which is dried in practice, and it may be surmised to consider the value of λ in the relation $K = \frac{100 \cdot \lambda}{r_0}$, which was reported in this study's No. 2, to be a constant value independent of moisture content.