

木材乾燥機構に関する研究 第7報

木材の水分伝導度による乾燥所要時間の 推定について

小 倉 武 夫⁽¹⁾

1. 緒 言

木材人工乾燥の要訣は、乾燥室内の材を均一に、乾燥による損傷なく、できるだけ速く乾燥することにある。このために人工乾燥に関する研究が今日まで数多く行なわれてきた。古くは、実際の乾燥室において乾燥操作を行ない、その乾燥経過を測定し、乾燥結果を比較することをくりかえし、乾燥スケジュールの適当なものを見いださんとしてきた。しかし、このような乾燥室内の材にたいして乾燥経過をたんに観察し、ただ経験的にのみその改良をはからんとしても問題の核心にふれることなく、成果を期待することも困難であつた。とくに乾燥室の材を対象とする場合は、室内における乾燥速度のむらは、程度の差こそあれさけることのできないものであり、成果のとりまとめに困難をきたしていた。

したがつて、最近この方面の研究は1個の試験材にたいして、恒温恒湿器により乾燥条件を一定に保ち、乾燥経過を測定して、乾燥の条件にたいする樹種の特性を求め、乾燥スケジュールの決定に根拠を見いださんとし、その結果を実際の乾燥室に応用せんとする方法が試みられてきた。

これにたいし、木材の乾燥現象は表面での蒸発よりも、内部における水分移動によつて制約されるとして、木材中の水分拡散に関する研究がはじめられ、この方面から乾燥に要する時間の計算も試みられてきた。含水率の多い材を乾燥させるときは、最初は表面蒸発によつて左右されるが、しだいに内部水分の移動、とくに繊維飽和点以下になると水分拡散になるなど、乾燥の主因子はしだいに推移するものと考えられる。したがつて木材乾燥のような複雑な現象はそれぞれの段階において究明し、それを総合しなければならない。

このような意味からは、従来の研究は、いずれもこれらの断片的なもので、総合的な体系づけられた研究としては、まだ見るべきものがないと称しても過言でない。木材表面における蒸発、内部における拡散などは、そのときの乾燥条件、材料の性質などによつて制約をうけるのであるから、この方面から、木材を人工乾燥した場合にどうしても必要な最低時間は究明されうるものと考えられる。また、実際の人工乾燥における乾燥時間の到達目標を、上述のようにして求められた乾燥の所要時間におくことができ、それ以上には、どうしても短縮できない時間数を知つておくこともまた乾燥操作上必要かくべからざることである。このような意味において、これに関する一連の研究を行なつてきたのである。

すでに報告してきた主なところは次のとおりである^{9)~14)}。

① 表面における蒸発にともなつて生ずる木材の内部における水分移動に関しては、熱伝導の方程式と同じ形の水分拡散方程式 $\left(\frac{\partial u}{\partial t} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)$ にしたがうかどうかを検討した。

(1) 木材部長・農学博士

② この方程式をとくために必要な境界条件に関しては、第 2 減率乾燥では表面含水率をそのときの乾燥条件に応ずる平衡含水率に達しているものとみなしたが、恒率乾燥においては初期表面含水率から繊維飽和点までは時間にたいして直線的に、第 1 減率乾燥では、繊維飽和点からそのときの乾燥条件に応ずる平衡含水率まで指数曲線的に低下するものとみなした。

③ 上述のそれぞれの境界条件にたいして、水分拡散方程式の解を求めたが、その解はいずれの乾燥段階でも実際の含水率—時間の関係とよく合致することを認めた。とくに第 2 減率乾燥では水分伝導度 K_0 の値もよく安定しており、この値を知れば、乾燥経過にたいする含水率の変動を推定することのできる見とおしをえたが、恒率と第 1 減率の乾燥段階、とくに、前者では、水分伝導度の値を安定したものと認められなかつた。

④ 第 2 減率乾燥における水分伝導度の値 (K_0) は樹種、乾燥条件などによつて影響をうけるものとし、樹種および板の厚さとの関係を求めた。

⑤ また水分伝導度 (K) は拡散係数 (λ) と $K=100\frac{\lambda}{r}$ の関係にあり、水分拡散係数の測定法を検討の上、若干の樹種、木取面、含水率、乾燥条件などにたいする関係を明らかにした。

しかしながら、乾燥されるべき材料の条件や乾燥条件などが与えられ、これに応ずる乾燥の所要時間を求めるためには、まだ未解決の点が多く、これらを明らかにしておかなければならない。

その主なるものは次のようなものである。

① 恒率乾燥においては、水分拡散方程式の適用は妥当でないことが認められたので、この期間の乾燥状態をどのような式で表わすか。

② 第 1 減率乾燥での表面含水率の低下は、指数曲線で示されるが、これらの経過状況が乾燥条件によつて、どのように影響され、その関係をいかに表わすか。

などであり、これらの点を明らかにできれば乾燥条件にたいする乾燥時間は水分伝導度の値に応じて算出することができよう。このためには、

③ 水分伝導度の樹種ごとの数値、その乾燥条件による影響。

④ 水分伝導度と拡散係数との関係。

なども明らかにしておく必要がある。

これらの問題に関して実験を中心にして、ある程度の成果をえたのでこれを発表するとともに、乾燥に関する諸条件を与えられればその所要時間を推定する計算図表もあわせて報告し、実用の便に供するようにした。

これら一連の研究は木材表面における水分蒸発、内部拡散などの乾燥条件による関係を明らかにし、乾燥時間の推定にまで一応の体系を作つたとはいえ、今後の研究にまつべき点のあまりにも多いことはいうまでもない。木材乾燥の実地面からみれば、木材の乾燥問題はたんに水分の移動性だけでうんぬんされるべきものでなく、乾燥の進行にともなつて内部応力の発生することは当然で、これらも現実には問題となる点である。いずれにしても、この研究は木材乾燥について一つの方面からの体系づけを試みただけで、むしろ今後研究すべき点を見だし、ようやくその緒についたばかりといえるが諸種の事情によつて、本研究を中止することにした。しかし、今後ふたたびこの残された点が明らかにされ、より明確な体系づけの行なわれることを期待してやまない。

この研究の実施にあつて始終ご指導と、格別のご便宜をかたじけなうした場長齋藤美鶴氏につつしん

で謝意を表す。またこの研究は木材部乾燥研究室で実験された実験結果にもとづく部分が多く、これら資料の提供を快諾された乾燥研究室長寺沢真技官、実験ならびに成果のとりまとめに協力をえた物理研究室大沼加茂也技官、梅原誠技官に衷心より感謝の意を表したい。

2. 水分伝導度

水分拡散方程式 $\frac{\partial u}{\partial t} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ の係数である水分伝導度 K の値は木材中の水分移動の難易を表わすものであり、乾燥の速さを示す一つの指標であること⁹⁾、また、その値は乾燥させる条件によつて影響をうけるので、これらの条件との関係を明らかにして、それを考慮しなければならないこと¹¹⁾、さらにこの値は恒率や第1減率の段階では不安定であるが、第2減率ではごく安定した値であること¹²⁾¹³⁾、などについて、すでに報告してきた。

それゆえに、水分伝導度は常に第2減率乾燥の値について述べることにし、この値が、その材料や乾燥条件によつてうける影響を明らかにしなければならない。

まず材料による影響に関しては、その材料の種類つまり樹種、材料の寸法すなわち厚さによる関係、乾燥条件については温度および乾湿球温度差との関係を明らかにしたので、その結果について述べる。

2.1 材の厚さとの関係

水分伝導度 K_2 の値は板の厚さによつて、ことなり、これらに間に次の関係があることを報告した⁹⁾。

$$K_2 = K_1 \left(\frac{l_1}{l_2} \right)^{n-2} \dots\dots\dots (2.1)$$

ただし、 l = 板の厚さ、 K = 厚さ l_1 にたいする水分伝導度 K_1 、 l_2 にたいしては K_2 、 n = やや厚い材料にたいしては $n=1.5$ とみなされる。

一般の板材にたいしては $n=1.5$ とみなされているので、これを用いると (2.1) 式は次のようになり、

$$K_2 = K_1 \sqrt{\frac{l_2}{l_1}} \dots\dots\dots (2.2)$$

K の値は板の厚さの平方根に比例して大きくなることになる。このように K の値が板の厚さによつて影響をうけることは、満久⁹⁾ によつても認められている。しかし、木材内の水分移動が、含水率差にもとづく水分拡散によつてのみ行なわれ、しかも拡散方程式 $\left(\frac{\partial u}{\partial t} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)$ を適用することができるとすれば、 K の定義からその値は厚さには関係なく一定の値であると考えなければならず、ここに実験と理論とは矛盾していることになる。この矛盾にたいして大草¹⁰⁾ は表面抵抗の概念を用いて解釈を与えたがこの妥当性は認めなければならない。しかし、実際問題としては、表面抵抗の値をあらかじめ求めておくこともできないし、乾燥所要時間を概略的に求めようとするこのような場合には、 K の値は厚さとの間に (2.2) 式の関係があるものとして、そのときの条件に応じて概算した値を用いて差し支えないものと考えられる。したがつて、 K の値は常に板厚を考慮し、規準の厚さで比較しなければならない。ここでは、その規準を 1cm とし、このときの水分伝導度の値をとくに K_0 とした。これらの K の厚さによる換算を容易ならしめるために、(2.2) 式の係数を図表化し、Fig. 1 に示した。これを用いれば、板の厚さが異なる場合でも K の値を簡単に換算することができる。

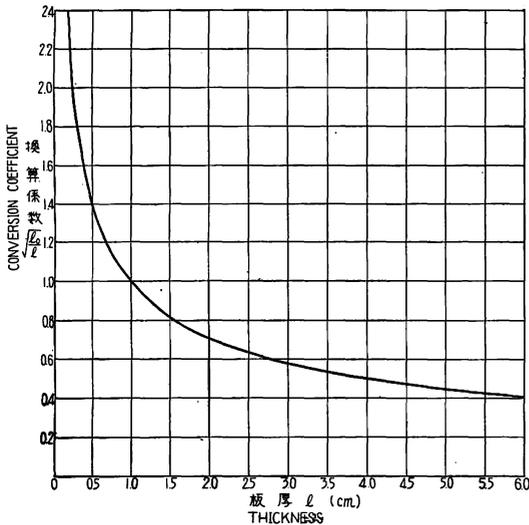


Fig. 1 K_0 の板厚にたいする換算係数
Conversion coefficient of K_0 to thickness
of board

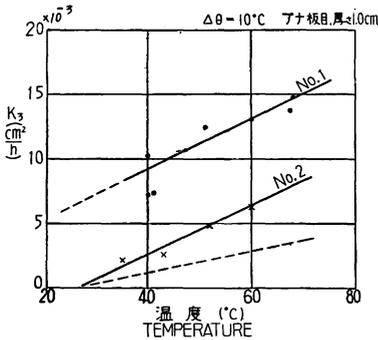


Fig. 2 K_3 と温度との関係
Effect of temperature on K_3

2.2 温度による影響

K_3 の値は温度が高いときほど大きくなり、しかもその関係はほぼ比例的であるということをすでに報告してきた¹¹⁾¹³⁾。いまふたたびこれらの結果だけを Fig. 2 に示した。図中の No. 1 の線はブナの寸法 $15 \times 10 \times 1.0$ (cm) の材料を用い、40, 50, 60, および 70°C の温度にたいし常に乾湿球温度差が 10°C 程度になるように適当な塩類を用い、乾燥経過を測定して K_3 の値を求めた結果である¹¹⁾。また、No. 2 は Red Oak (5 cm 厚) を I. F 型乾燥室内で、温度 95, 110, 125, 140°F のそれぞれにたいし、すべて同じ平均含水率にたいしては同じ平衡含水率を示すような空気条件に調節して乾燥させ、その経過から K_3 の値を求めたものである¹³⁾。この図で見るよ

うに、これらの異なつた実験結果から求められた K_3 と温度との関係を示す線は、ほぼ平行しており、この両者は温度にたいし同じ関係にあるようにみられる。しかし K_3 の絶対値は材料の種類、厚さ、さらに乾燥条件などによつて異なつた値を示し、No. 1 は厚さ 1 cm の K_3 の値であるが、No. 2 は 5 cm であるので、これを厚さ 1 cm に相応する値に換算し、これを破線で示した。こうして比べてみると、これらの両者の温度にたいする関係は同じとはいいがたく、いずれが正しいかは不明である。

従来、このような K_3 -値の温度による影響だけを実験的に求めた例は、ほとんど見当たらない。亀井⁹⁾ はヒノキについて関係湿度を 60% に保つてこの関係を求めているが、乾燥速度は関係湿度よりむしろ蒸気圧差に左右されるため、この結果はただ温度だけの影響をうけているものとは判断しがたく、これを比較の対象とすることはできない。このほかには適当な実験例はないようである。

STAMM¹³⁾ は計算によつて、ディメンション $\left[\frac{L^2}{T} \right]$ の Diffusion Coefficient を求め、温度による影響を明らかにし、これを SHERWOOD と COMINGS¹⁷⁾ の実験結果と比較している。STAMM の結果ではこの Diffusion Coefficient は温度とともに放物線的に増大し、しかも比重の軽いほどその影響は大きく、広葉樹で比重の中庸より大きいもので、温度範囲も $60 \sim 70^\circ\text{C}$ 程度までであれば、直線にかなり近づいている。また SHERWOOD と COMINGS の測定値は放物線よりむしろ直線とみてさしつかえないようである。さらに KRÖLL⁹⁾ も木材中の蒸気の移動を示す係数——Bewegungs-beiwert 移動係数——を計算によつて求め、温度との関係をえており、温度範囲が $40 \sim 70^\circ\text{C}$ 程度であれば直線とみなしうるようであるが、その程度

は STAMM の求めた温度との関係よりは少なくなつたことを報告している。

一方、 K_3 値は第2減率乾燥での乾燥速度を与える係数とも考えられ、所要乾燥時間とは逆比例の関係にある。したがつて、 K_3 値と温度との関係は乾燥時間と温度との関係によつても検討することができる。TUOMOLA¹⁾ は含水率が繊維飽和点以下になれば乾燥時間は明らかに温度の n 乗に反比例することを報じているが、実用的立場では温度と反比例的な関係にあることを認めている。SCHÜLTER & FESSEL¹⁶⁾ も厚さ 20 mm のナラ材、ブナ材を含水率 20% から 7% に乾燥させるのに温度 60~75°C を用い、乾燥の所要時間は温度に逆比例するものとみなしうことを認めている。

このように、乾燥速度を示す係数である K_3 値は温度と逆比例的な関係にあるとみなしてさしつかえないようである。ここに問題になるのはその影響する程度である。前述の2つの実験の結果や従来の結果などから、温度にたいする変化数を求めて Tab. 1 に示した。これによると、全く区々でいずれが正しいか判断のできない状態である。とくにいずれも材料や乾燥条件などが区々であつて互いに数値を比較できる資料ではない。実験 No. 2 の場合は実際の乾燥室を用い、長期日をかけて乾燥させた結果であり、供試材の数も少なく、かつ乾湿球温度差を乾燥の進行とともに変化させたものであるから、その絶対値は安定した条件下で測定されたものとはいいがたい。これにたいし、実験 No. 1 の値は一定の実験条件下で求められたもので数値としては適当ではないかと考えられる。また、これは KRÖLL の結果ともほぼ一致しているが、ただこれだけの結果から絶対値の適否を判断することもできない。しかし、ここでは K_3 と温度との間には実験 No. 1 でえた関係が一応正しいものとみなすことにしておく。

また、このように温度が高いほど K_3 値の大きくなる関係は、水の粘性係数の逆数 $\frac{1}{\eta}$ が温度とともに増大するのと全く同じであることをすでに報告した¹¹⁾。これによると温度の高くなるほど水分移動の容易になるのは、温度上昇による水の粘性係数の低下によるものと推定することもできよう。

2.3 乾湿球温度差による影響

2.3.1 既往の結果

この関係については、ナラ板目の寸法 3.5×2.5×0.15 (cm) の薄い材料を用い温度 50°C で、関係湿度を 80, 60, 40, 30 および 15% にかえた場合の結果をすでに報告した¹¹⁾。この場合の K_3 の値は厚さが 1.5 mm であるので、これを 1.0 cm に換算したが、その値と蒸気圧差との関係は、Fig. 3 に示すようにはほぼ直線的な関係がえられた。また、亀井²⁾ は木材だけでなく、粘土やパルプについても実験したが、木材の供試材にはヒノキの 1.5 cm 厚の材料をえらんだ。その結果は木材でも、他の材料でも同様にやはり関係湿度の低いほど K_3 値は大きくなることを報

Table 1. K_3 の温度による変化係数
Effect of temperature on K_3

$\frac{dK_3}{d\theta} \left[\frac{cm^2}{h \cdot \theta} \right]$	Author
2×10^{-4}	OGURA No. 1
0.8	OGURA No. 2
8	SHERWOOD & COMINGS
2.5	KRÖLL

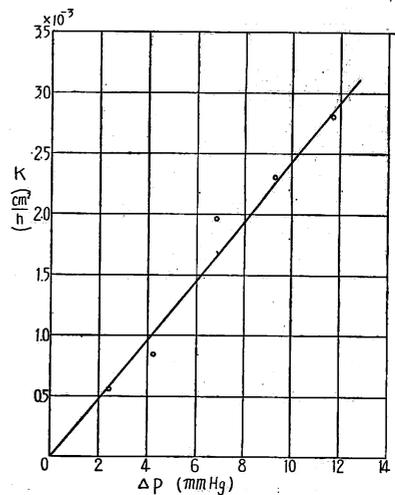


Fig. 3 水分伝導度の蒸気圧差による影響
Effect of vapor pressure difference on moisture conductivity K

じている。

このように 1.5 cm 程度より薄い材料については K_3 値は蒸気圧差とともに直線的に増大する結果がえられているが、少なくとも 2~3 cm 程度の材料についての結果はどうであろうか？ この点について検討を試みた。

2.3.2 床板の乾燥試験結果で求めた K_3 値による検討

木材部乾燥研究室において床板原板(厚さ 20~30 mm)を自然循環および強制循環(風速 70~100 cm/s)の実験装置を用いて、Tab. 2 に示すような条件下で乾燥実験を行なつたが、その資料から K_3 の値を求めてみた。この場合は、含水率の多い材を乾湿球温度差の大きい条件で乾燥させると損傷をおこすおそれがあるので、含水率の多い材はゆるい乾燥条件のもとで乾燥させ、そののち乾湿球温度差を大きくして新しい乾燥条件としての水分減少経過を求めた。したがつて、乾湿球温度差の少ない条件にたいしては、その条件に応ずる乾燥の末期に近い部分の経過がなく、乾湿球温度差の大きい条件では乾燥初期の経過を欠いているので、全乾燥過程の乾燥曲線は描くことはできないけれども、実際の乾燥操作においては、この

Table 2. 供試材料と実験条件
Materials and conditions experimented

型式 Type	樹種 Species	比重 Sp. gr. g/cm ³	厚さ Thick. cm	温度 Temp. °C	乾湿球温度差 Wet. bulb. dep. °C	備考 Remarks
自然循環式実験 Natural circulation	ブナ Beech	0.65	2.25	60	5, 15, 20, 25	心材(床板原板) Heartwood (Flooring)
	ブナ Beech	0.60	2.25	60	3, 5, 10, 15, 25	辺材(床板原板) Sap wood (Flooring)
強制循環式実験 Forced circulation	イヌブナ Beech	0.54	2.25	60	3, 5, 10, 15, 20	辺材 Sap wood
	ブナ Beech	0.65	2.25	60	5, 10, 15, 25	心材 Heart wood
	ナラ Oak	0.60	2.0	60	2, 5, 10, 15, 20, 25	桁目, 床板 Quartersawed, Flooring
	ナラ Oak	0.60	2.8	60	2, 5, 10, 15, 20	板目, 吋板 Plainsawed, Inch board

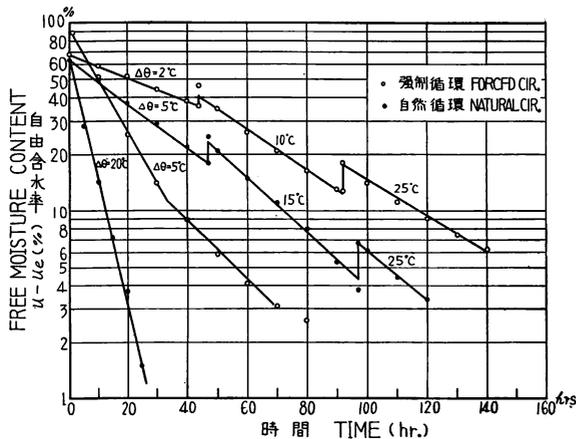


Fig. 4 自由含水率であらわした乾燥経過
Drying courses of board expressed
by free moisture content

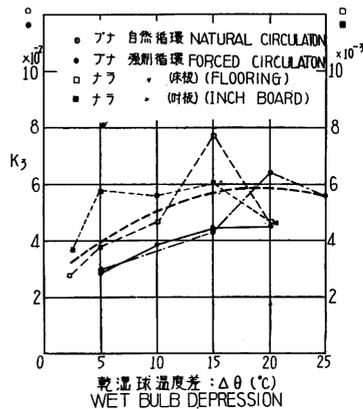


Fig. 5 自然循環, 強制循環乾燥で求めた
 K_3 値と乾湿球温度差との関係
Relation between K_3 -values obtained
in natural- and forced-circulation-kiln
and wet bulb depression

ような状態になるので、実用的見地で乾燥経過曲線から K_3 値を求めるためには、この程度の経過曲線で十分目的にかなっているといえよう。

上述した乾燥条件にたいする乾燥経過の一例を Fig. 4 に示した。これでは含水率を自由含水率で示したが、乾燥経過の大部分は指数的事であることがわかる。Fig. 5 はこれらの結果から求めた K_3 値と乾湿球温度差との関係を示したものである。一般には乾湿球温度差が大きくなると K_3 の値は増加しているようである。しかし、乾湿球温度差がある程度以上になると K_3 の値はかえって低下している。この原因は乾湿球温度差が大きくなると表面蒸発がさかんになり、表面に近い部分だけが過度に乾燥して、水分傾斜が部分的にいちじるしく急峻になり、内部での水分移動が低下するためと思われる。

また、自然循環による結果と強制循環のものとを比べれば、乾湿球温度差の 15°C まではよく合致しているが、温度差が大きくなると自然循環による値の方が大きくなっている。これもやはり強制循環の方が表面蒸発がいちじるしく大きくなりすぎるためと考えられる。

2.3.3 K_3 の乾湿球温度差による影響

以上述べたように、材料の薄い場合と厚い場合では異なつた結果がえられた。このいずれを適用すべきであろうか？ 従来乾燥試験の結果からみて含水率が繊維飽和点以上のときは乾燥速度は乾湿球温度差とともに比例的に大きくなるが、繊維飽和点以下の場合には複雑な関係を呈し、簡単ではないことを指摘している。TUOMOLA⁴⁾ はいろいろの関係湿度下において乾燥速度をもとめたが、関係湿度が低くなるほどかえって速度はおそくなり、しかもその低下の程度は乾球温度の高いほどいちじるしくなることを報告している。これらは前項の結果と同じ傾向にあるものということができ、ある程度の厚さをもつ板材の乾燥速度は、空気条件による蒸発力よりむしろ木材内部での拡散速度に支配され、しかもこのことは板材の厚さが厚いほどいちじるしくなるからである。これらの関係についてはまだ多くの問題が残され、とうてい決定的なことはいえないが、木材乾燥において概略的な乾燥時間を知らうとするこの研究では、 K_3 の乾湿球温度差による影響は Fig. 5 の点線で示されるような関係にあるとしておく。これらの関係については、まだ実験資料も少なく今後の研究にまたなければならぬ。

2.4 水分伝導度の温度、乾湿球温度差にたいする換算係数

上述したように、水分伝導度の値は温度や乾湿球温度差によつてそれぞれ異なつた影響をうけている。実際にはこれらの2つが複合的に影響するが、これがどのようになるかを明らかにしておかなければなら

Table 3. 温度 50°C 、乾湿球温度差 10°C の K_3 を基準とした
各種条件にたいする換算係数
Coefficients to obtain K_3 -value of various conditions, which were calculated
on the basis of that of temperature 50°C and wet bulb depression 10°C

Wet bulb dep. $^{\circ}\text{C}$	Temp. $^{\circ}\text{C}$ K_3 $\theta=50^{\circ}\text{C}, \Delta\theta=10^{\circ}\text{C}$	40	50	60	70
		$\times 10^{-2}$ 0.93	1.12	1.31	1.50
2.5	3.5×10^{-2}	0.55	0.66	0.77	0.87
5	4.2	0.65	0.79	0.93	1.06
10	5.3	0.83	1.00	1.17	1.34
15	6.0	0.94	1.13	1.32	1.52
20	6.2	0.97	1.17	1.37	1.57
25	5.9	0.92	1.11	1.30	1.49

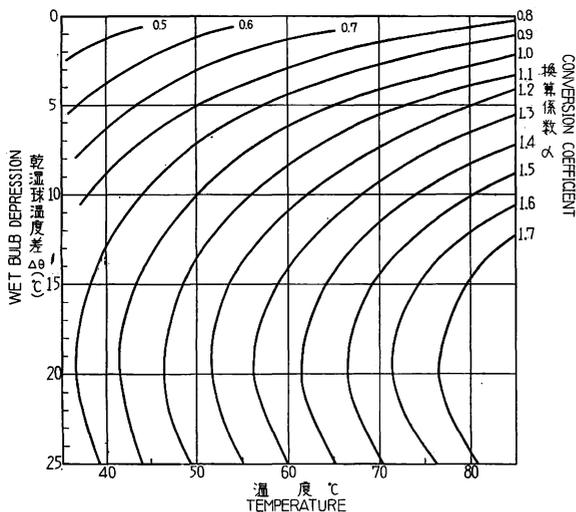


Fig. 6 K_0 -値の乾燥条件による換算係数図
Chart of conversion coefficient of K_0 for drying condition

$K = \alpha \times K_0$, where K_0 = moisture conductivity at temperature of 50°C, wet bulb depression of 10°C, and thickness of 1.0 cm

ない。このためには、たとえば乾湿球温度差による影響にしてもはたしてどの温度においても同じ結果になるか、またこれらの乾燥条件による影響がどの樹種についても同じであるかなどを確かめる必要があるが、これにたいしてはまだ確実な成果はえられていない。ここでは樹種にかかわらず温度にたいしては常に同じ関係にあるものと仮定した。すなわち、2.2, 2.3 でえた温度、乾湿球温度差にたいする係数が、複合的にはたらくものとして、Tab. 3 に示すような換算係数を作成した。Fig. 6 はこれを図示し、温度 50°C、乾湿球温度差 10°C の値を規準にして他の各温度、乾湿球温度差にたいして容易に換算のできるようにした。もちろんこの換算値は今後の研究に

よつてまた改正さるべきであろうが、現在においては水分伝導度を温度、乾湿球温度差によつて換算するには、この図表を利用することにした。

2.5 各樹種の水分伝導度の値

第 2 減率乾燥においては、その初期含水率 u_{m2} 、乾燥条件に対応する平衡含水率 u_e 、 K_3 の値などを知れば、乾燥経過は後述するように次の (6.5) 式で示される。

$$u_m = u_e + (u_{m2} - u_e) e^{-K_3 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t} \dots\dots\dots (6.5)$$

含水率を自由含水率で示せば、この式から乾燥速度は

$$\frac{dU_m}{dt} = -K_3 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 U_m \dots\dots\dots (2.3)$$

となるので、乾燥速度を知られば、 K_3 の値は簡単に求めることができ、これを利用する方が従来求めてきた方法よりはるかに簡単である。乾燥研究室で多くの樹種について温度 60°C、乾湿球温度差 25°C、風速 0.75 m/s のもとで、初期含水率 30~40% (厚さ 2~3 cm) の材料を乾燥させて重量減少の経過を求めた。これらの資料によつて上式から水分伝導度の値を計算し、さらに厚さ 1.0 cm、温度 50°C、乾湿球温度差 10°C の値に換算して標準的な各樹種の水分伝導度を求め Tab. 4 に示した。

すでに水分伝導度と比重の関係については報告したが⁹⁾、この場合は自然循環方式の装置を用い、温度 50°C、乾湿球温度差 10°C の条件で測定されたものである。これによつて求めた結果、さらに STAMM¹⁹⁾ が計算によつて求めた曲線とあわせて Fig. 7 に示した。

ここに求めた結果は樹種による特性がいちじるしく、測定値にもかなりのバラツキがあり、とうてい単純な曲線で示すことはできないようであるが、傾向としては STAMM の曲線の方がより適合しているよう

Table 4. 各樹種の K_0 -値
 K_0 -values of various species

樹種 Species	乾燥速度 (自由含水率5%における) Drying rate at 5% free m.c. %/h	比重 Specific gravity g/cm^3	厚さ Thick-ness cm	水分伝導度 Moisture conductivity cm^2/h	K_0 (50°C, 10°C dep.) cm^2/h	平均値 Mean cm^2/h
サワラ <i>Chamaecyparis pisifera</i>	0.260	0.31	2.17	$\times 10^{-2}$ 1.69	$\times 10^{-2}$ 1.30	$\times 10^{-2}$ 1.18
	0.210	0.33	2.17	1.36	1.05	
ネズコ <i>Thuja standishi</i>	0.210	0.32	2.15	1.34	1.03	1.24
	0.294	0.32	2.16	1.89	1.45	
アスナロ <i>Thujopsis dolabrata</i>	0.256	0.36	2.16	1.64	1.26	1.30
	0.261	0.36	2.20	1.73	1.33	
トドマツ <i>Abies Mayriana</i>	0.415	0.37	2.12	2.58	1.99	1.04
	0.355	0.36	2.11	2.19	1.69	
トウヒ <i>Picea jezoensis</i> var. <i>hondoensis</i>	0.353	0.38	2.20	2.33	1.79	1.79
	0.366	0.38	2.28	2.33	1.79	
コウヤマキ <i>Sciadopitys verticillata</i>	0.366	0.39	2.17	2.37	1.82	1.77
	0.338	0.38	2.20	2.24	1.72	
アオモリトドマツ <i>Abies Mariesii</i>	0.385	0.39	2.20	2.41	1.85	1.87
	0.365	0.41	2.23	2.46	1.89	
ヒノキ <i>Chamaecyparis obtusa</i>	0.225	0.40	2.15	1.44	1.11	1.12
	0.230	0.41	2.15	1.46	1.12	
モミ <i>Abies firma</i>	0.335	0.38	2.19	2.19	1.69	1.67
	0.335	0.40	2.15	2.13	1.64	
ハリモミ <i>Picea polita</i>	0.337	0.40	2.23	2.27	1.75	1.89
	0.395	0.40	2.22	2.64	2.03	
アカエゾマツ <i>Picea Glehnii</i>	0.326	0.41	2.23	2.20	1.69	1.69
	0.314	0.41	2.29	2.20	1.69	
エゾマツ <i>Picea jezoensis</i>	0.388	0.41	2.26	2.32	1.79	1.91
	0.380	0.42	2.28	2.64	2.03	
ヒメコマツ <i>Pinus parviflora</i>	0.215	0.44	2.24	1.22	0.938	0.90
	0.160	0.43	2.28	1.11	0.854	
ツガ <i>Tsuga Sieboldii</i>	0.300	0.46	2.24	2.03	1.56	1.53
	0.300	0.47	2.18	1.95	1.50	
イラモミ <i>Picea bicolor</i>	0.281	0.46	2.19	1.84	1.42	1.28
	0.256	0.48	2.10	1.47	1.13	
カラマツ <i>Larix Kaempferi</i>	0.230	0.49	2.18	1.50	1.15	1.23
	0.262	0.49	2.16	1.69	1.30	
アカマツ <i>Pinus densiflora</i>	0.268	0.51	2.17	1.74	1.34	1.25
	0.224	0.50	2.21	1.49	1.15	
クロマツ <i>Pinus Thunbergii</i>	0.230	0.52	2.27	1.59	1.22	1.31
	0.274	0.49	2.20	1.81	1.39	
キリ <i>Paulownia tomentosa</i>	0.491	0.26	1.96	2.73	2.10	2.10
ドロノキ <i>Populus Maximowiczii</i>	0.297	0.32	2.21	1.98	1.52	1.75
	0.380	0.32	2.23	2.57	1.98	

Table 4. (つづき)

樹種 Species	乾燥速度 (自由含水率5%における) Drying rate at 5% free m.c. %/h	比重 Specific gravity g/cm ³	厚さ Thick-ness cm	水分伝導度 K Moisture conductivity cm ² /h	K ₀ (5°C, 10°C dep.) cm ² /h	平均値 Mean cm ² /h
バツコヤナギ <i>Salix Bakko</i>	0.176	0.37	2.23	1.19	0.915	0.82
	0.141	0.35	2.20	0.932	0.717	
オウバシナノキ <i>Tilia Miyabei</i>	0.390	0.38	2.16	2.50	1.92	1.87
	0.370	0.39	2.15	2.36	1.82	
ホオノキ <i>Magnolia obovata</i>	0.200	0.44	2.21	1.33	1.02	1.05
	0.210	0.45	2.22	1.40	1.08	
サワグルミ <i>Pterocarya rhoifolia</i>	0.236	0.45	2.14	1.49	1.15	1.14
	0.229	0.45	2.14	1.45	1.12	
カツラ <i>Cercidiphyllum japonicum</i>	0.142	0.46	2.20	0.94	0.722	0.70
	0.136	0.47	2.19	0.89	0.685	
シナノキ <i>Tilia japonica</i>	0.270	0.47	1.89	1.42	1.09	1.27
	0.350	0.47	1.91	1.88	1.45	
センノキ <i>Kalopanax ricinifolium</i>	0.278	0.49	2.22	1.86	1.43	1.45
	0.280	0.47	2.25	1.91	1.47	
オニグルミ <i>Juglans Sieboldiana</i>	0.230	0.52	2.27	1.59	1.22	1.20
	0.225	0.49	2.25	1.53	1.18	
アカダモ <i>Ulmus japonica</i>	0.140	0.53	2.11	0.86	0.664	0.81
	0.195	0.52	2.14	1.23	0.946	
シオジ <i>Fraxinus commemoralis</i>	0.183	0.53	2.16	1.18	0.908	0.90
	0.170	0.51	2.23	1.15	0.885	
トチノキ <i>Aesculus turbinata</i>	0.205	0.55	2.21	1.26	0.970	1.14
	0.252	0.54	2.23	1.70	1.31	
ヤチダモ <i>Fraxinus mandshurica</i>	0.148	0.59	2.27	1.02	0.785	0.77
	0.150	0.60	2.19	0.986	0.758	
イタヤカエデ <i>Acer pictum subvar.</i>	0.205	0.61	2.17	1.33	1.02	1.18
	0.225	0.61	2.20	1.48	1.14	
	0.242	0.63	2.22	1.66	1.28	
	0.225	0.69	2.31	1.60	1.23	
ナラ <i>Quercus crispula</i>	0.495	0.66	0.625	0.50	0.386	0.50
	0.765	0.67	0.630	0.78	0.605	

にみうけられる。強制循環方式で求めた K₀ の値が同じ比重にたいして一般に低い傾向を与えている。これは試験した乾湿球温度差が 25°C であつたためではないかとも思われ、ここに表示した水分伝導度の絶対値が正しいかどうかは試験法も異にしているため疑問であるが、樹種の間を比較することはできよう。いずれにしても従来各樹種に関するこれらの値が全く発表されていないので、ここに求めた値は一つの参考になるものと思われる。

また、乾燥に要する時間を略算する方法を目的とするこの研究にあつては、今後の木材乾燥法が、自然循環方式から強制循環方式へ移行されるために、水分伝導度の値も Tab. 4 に示した強制換気で求めたのがむしろ適しているものといえよう。

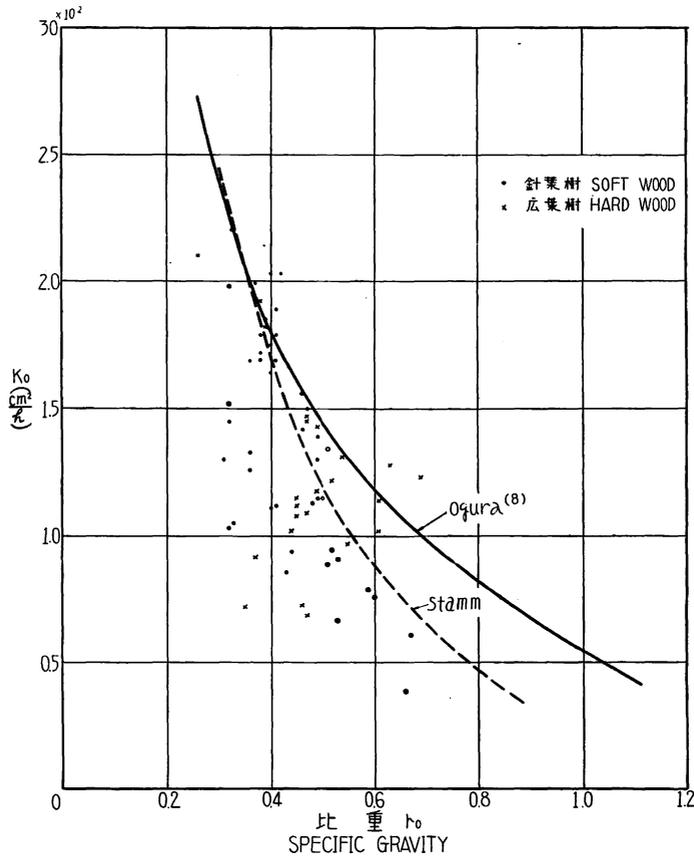


Fig. 7 K_0 と比重との関係図
Relationship between K_0 and specific gravity

3. 水分伝導度と拡散係数の関係

水分の拡散方程式 $\frac{\partial u}{\partial t} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ における係数 K (水分伝導度) はその誘導からあきらかなように

$$K = 100 \frac{\lambda}{r_0} \dots \dots \dots (3.1)$$

ただし λ = 水分拡散係数, r_0 = 比重

で表わされる⁹⁾。したがつて、水分伝導度と比重との値を知れば拡散係数は簡単に算出されるはずである。このようにして計算された拡散係数の値が、はたして全く別個に実験によつて求めた拡散係数の実測値と、どのような関係にあるかを検討しておかなければならない。もし(3.1)式の関係が実験的にも確認されるならば、水分伝導度と拡散係数との数値的換算が可能となるわけで実際にはつごうがよいので、この点を従来までに得られた実験結果によつて検討してみる。

3.1 拡散係数の値

拡散係数 λ の測定法についてはすでに報告し、飽和溶液に $Pb(NO_3)_2$ と KBr とを用い、ヒノキについて実験を行ない、 λ -値の材の木取り面、厚さおよび温度などによる影響についても報告してきた¹⁴⁾。

Table 5. 拡散係数測定結果
Diffusion coefficients λ_0 measured

樹種 Species	木取面 Sawed face		比重 Sp. Gr. g/cm ³	厚さ Thick- ness cm	水分移動量 Amount of moisture moved g/h	平衡含水率差 Equilibrium moisture content %	拡散係数 Diff. coef.		平均値 Mean
							λ	λ_0	
サワグルミ <i>Pterocarya rhoifolia</i>	追	柁 bastard sawn	0.30	0.25	0.073	2.9	$\times 10^{-4}$ 0.62	$\times 10^{-4}$ 0.99	$\times 10^{-4}$ 1.03
	追	柁 "	0.29	0.24	0.075	2.7	0.67	1.08	
	追	柁 "	0.30	0.25	0.075	3.1	0.63	1.01	
アオモリ トドマツ <i>Abies Mariesii</i>	追	柁 bastard sawn	0.35	0.25	0.0725	3.2	0.57	0.91	} 0.98
	追	柁 "	0.35	0.25	0.074	3.0	0.62	0.99	
	追	柁 "	0.36	0.25	0.076	2.8	0.66	1.05	
スギ <i>Crypto- meria japonica</i>	板	目 flat grained	0.33	0.26	0.0835	2.2	1.00	1.59	} 1.63
	板	目 "	0.30	0.26	0.071	1.6	1.18	1.88	
	板	目 "	0.31	0.25	0.057	1.7	0.89	1.42	
	心材板	目 " (Heart)	0.35	0.27	0.060	4.5	0.36	0.57	
ヒノキ <i>Chamaecy- paris obtusata</i>	柁	目 edge-grained		0.26	0.102	6.0	0.45	0.71	} 0.68
	柁	目 "		0.24	0.113	6.0	0.45	0.72	
	柁	目 "		0.24	0.093	6.0	0.38	0.61	
	板	目 flat-grained		0.26	0.082	6.2	0.35	0.56	} 0.55
	板	目 "		0.25	0.084	6.2	0.33	0.53	
クリ <i>Castanea crenata</i>	追	柁 bastard sawn	0.49	0.24	0.065	2.1	0.75	1.21	} 1.08
	追	柁 "	0.51	0.25	0.0725	3.0	0.61	0.97	
	追	柁 "	0.49	0.24	0.0775	2.8	0.65	1.05	
ソウジ <i>Fraxinus spethiana</i>	追	柁 bastard sawn	0.56	0.26	0.0675	3.2	0.55	0.87	} 0.95
	追	柁 "	0.56	0.25	0.069	2.3	0.76	1.22	
	追	柁 "	0.55	0.26	0.0665	3.6	0.47	0.75	
ブナ <i>Fagus arenata</i>	心材板	目 plainsawed	0.58	0.25	0.049	3.0	0.41	0.66	} 0.66
	心材板	目 "	0.58	0.25	0.051	3.2	0.41	0.66	
	心材板	目 "	0.60	0.24	0.050	3.0	0.41	0.66	
ナラ <i>Quercus mongolica</i>	心材板	目 plainsawed	0.60	0.26	0.046	3.1	0.38	0.60	} 0.57
	心材板	目 "	0.64	0.25	0.045	3.4	0.33	0.53	
	心材板	目 "	0.46	0.26	0.051	2.3	0.64	1.02	
ミズメ <i>Betula carpinifolia</i>	追	柁 bastard sawn	0.67	0.25	0.067	2.8	0.61	0.97	} 0.95
	追	柁 "	0.69	0.25	0.065	2.9	0.59	0.94	
	追	柁 "	0.68	0.25	0.0675	3.7	0.49		
オノレ カシ <i>Betula Schmidtii</i>	追	柁 bastard sawn	0.96	0.27	0.0235	5.4	0.12	0.19	} 0.20
	追	柁 "	0.96	0.27	0.0290	6.0	0.14	0.22	
	追	柁 "	0.99	0.27	0.0235	5.4	0.12	0.19	
カツラ <i>Cercidy- phyllum japonicum</i>	心材板	目 plainsawed	0.48	0.80	0.0367	5.9	0.50	0.55	} 0.61
	心材板	目 "	0.50	0.80	0.0427	6.2	0.55	0.60	
	心材板	目 "	0.51	0.79	0.0544	7.0	0.61	0.68	
ブナ <i>Fagus crenata</i>	心材板	目 plainsawed	0.56	1.01	0.0452	7.6		0.60	} 0.56
	心材板	目 "	0.56	1.00	0.0456	8.6		0.53	
	心材板	目 "	0.56	1.00	0.0449	8.1		0.56	
	心材板	目 "	0.51	1.00	0.0732	6.5		1.12	} 1.06
	心材板	目 "	0.52	1.00	0.0662	6.6		1.00	
ナラ <i>Quercus mongolica</i>	心材板	目 plainsawed	0.60	1.01	0.0377	6.0		0.64	} 0.59
	心材板	目 "	0.66	1.01	0.0338	6.1		0.56	
	心材板	目 "	0.67	1.00	0.035	6.2		0.57	
	心材柁	目 quarter sawed	0.72	1.01	0.0262	6.8		0.39	} 0.43
	心材柁	目 "	0.72	1.01	0.0287	6.3		0.46	
	心材柁	目 "	0.71	1.01	0.0271	6.2		0.44	
	心材柁	目 "							

いままでに用いたのと同じ実験装置により、温度を 50°C、塩類に $Pb(NO_3)_2$ と KBr とを使用し、なるべく広い範囲にわたる比重の樹種について λ の値を求めた。樹種は比重の軽いサワグルミ ($\gamma_0=0.30$) から重いオノオレカンバ ($\gamma_0=0.99$) にいたる 11 種で、供試片の大きさは 10×10 (cm)、厚さは主に 0.25 cm である。ここにえらんだ樹種は必ずしも適当なものとはいえないが、いままでに測定したものだけをとりまとめて測定値の主なものと拡散係数値とを Tab. 5 に示した。前に報告したように¹⁴⁾、 λ の値も厚さによつて影響をうけるので、その値を比較するためには同じ厚さの値に換算しなければならない。このために厚さ 1.0 cm を比較の基準とし、このときの換散係数を λ_0 として、その値も同表に示した。厚さ 1.0 cm の値に換算するには、前に報告した

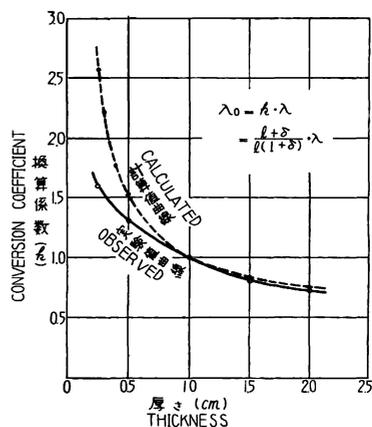


Fig. 8 厚さにたいする換散係数 Conversion coefficient of λ_0 to thickness of board

Fig. 8 を用いたが、この場合その計算値曲線と実験値曲線とのいずれによるべきかが問題である。厚さの薄い 0.25 cm は測定値が計算値からはずれており、しかもその原因が明らかでなく、かつ、この実験に用いた試料の厚さは、ほとんど 0.25 cm 程度であり、実験も全く同じ条件で行なわれているので、厚さ 0.25 cm の値を 1.0 cm に換算するには、計算値曲線よりは実験値曲線を用いる方が実際に即した換算が行なわれると思われるので、同図の実験値曲線を用いて換算することにした。Tab. 5 の λ_0 はこの方法で求めたものである。

さらに同表のなかから樹種および木取り法のものだけの λ -平均値を求めて、その比重との関係を Fig. 9 に図示した。これをみると、まだ実験の数も少なく、比重全般にたいする

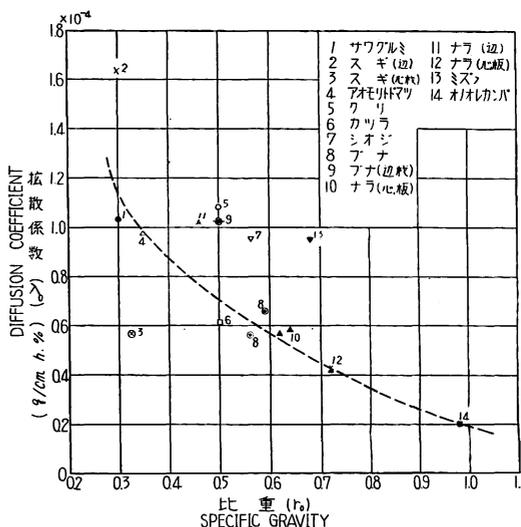


Fig. 9 厚さ 1.0 cm における拡散係数 λ_0 と比重との関係

Relationship between specific gravity and diffusion coefficient λ_0 at thickness of 1.0 cm

λ -値の傾向を判断することは適当でないかもしれないが、しいていえば、比重の大きくなるほど λ -値は、概して小さくなるようである。このことは 2.5 における比重と K_s -値との関係と同様であり、水分の移動性を示す λ -値は、たんに比重という因子でうんぬんすることはできなく、その材の細胞構成、さらに細胞腔の内容物の有無などによるものと考えられ、今後の研究にまたなければならない。

3.2 拡散係数の計算値と実測値との比較

水分伝導度 K の値は、すでに述べたように、第 2 減率乾燥の段階においても、材料の厚さ、温度、乾湿球温度差、風速などの乾燥条件によつて左右され、拡散係数 λ の値もまた、材料の厚さ、平均含水率、温度などの条件によつて影響される。したがつて、この両者を比較する場合には、まず材料にたいする条件

や乾燥条件などを同じくすることを考慮しなければならない。しかし、水分伝導度の値は乾湿球温度差の増加につれて大きくなる傾向がみとめられたが、拡散係数の値は 2 点間の蒸気圧差、いいかえると湿球温度の差が大きくなつてもほとんど変わらないようであり、この点に K と λ との関係はかなり異なつた傾向がみとめられる。また、材の厚さや温度などの条件にたいする影響の程度も K -値と λ -値とでは必ずしも同じとはいえない状態にある。したがつて、それぞれ別個の実験によつて求めた場合、水分伝導度と拡散係数の値とは、常に (3.1) 式の関係にあるとはかぎらないことになる。すでに得られた結果を利用して、このことについての比較検討を試みる。

(1) ブナ、ナラの床板、吋板をいろいろの乾湿球温度差で乾燥させて水分伝導度を求めた。これらの

Table 6. 同一資料を用いたときの拡散係数の計算値と実験値の比較
Comparison of diffusion coefficient λ obtained in calculation with that measured in the case the same materials were used

樹種 Species	乾湿球 温度差 Wet bulb dep. °C	水分伝導度 Moisture conductivity $K_0 \left(\frac{cm^2}{r} \right)$	比重 Specific gravity r_0	$\lambda_{calc.}$ $g/cm \cdot h \cdot \%$	λ_0 $g/cm \cdot h \cdot \%$	$\xi = \frac{\lambda_{calc.}}{\lambda_0}$
ナラ 柾目 <i>Quercus mongolica</i>	2.0	2.4×10^{-3}	0.72	0.17×10^{-4}	} 0.4×10^{-4}	0.43
	5.0	2.9 "	"	0.21 "		0.52
	10.0	3.3 "	"	0.24 "		0.60
ナラ 板目 <i>Quercus mongolica</i>	2.0	2.6 "	0.66	0.17×10^{-4}	} 0.56×10^{-4}	0.30
	5.0	4.2 "	"	0.28 "		0.50
	10.0	4.0 "	"	0.26 "		0.46
ブナ <i>Fagus crenata</i>	5.0	2.1×10^{-2}	0.51	1.1×10^{-4}	} 1.1×10^{-4}	1.0
	10.0	2.7 "	"	1.4 "		1.3
カツラ <i>Cercidiphllum japonicum</i>	5.0	1.4 "	0.50	0.7×10^{-4}	} 0.55×10^{-4}	1.3
	10.0	1.6 "	"	0.8 "		1.5

Table 7. 各樹種拡散係数の計算値と実測値の比較
Comparison of diffusion coefficient λ_0 experimented with that calculated by moisture conductivity and specific gravity

樹種 Species	水分伝導度 Moisture conductivity $K_0 (cm^2/h)$	比重 Specific gravity r_0	$\lambda_{calc.}$ $g/cm \cdot h \cdot \%$	λ_0 $g/cm \cdot h \cdot \%$	$\xi = \frac{\lambda_{calc.}}{\lambda_0}$
オノオレカンバ <i>Betula Schmidtii</i>	6.0×10^{-3}	1.0	0.6×10^{-4}	0.2×10^{-4}	3.0
ブナ <i>Fagus crenata</i>	8.0 "	0.61	0.49 "	0.66 "	0.82
スギ <i>Cryptomeria japonica</i>	14.0 "	0.43	0.60 "	1.63 "	2.7
ヒノキ <i>Chamaecyparis obtusa</i>	19.5 "	0.45	0.88 "	0.68 "	1.3
サワグルミ <i>Pterocarya rhoifolia</i>	19.2 "	0.30	0.57 "	1.03 "	0.55
アオモリトドマツ <i>Abies Mariesii</i>	17.5 "	0.35	0.61 "	0.98 "	0.63

うちから乾湿球温度差, 2, 5 および 10°C にたいする水分伝導度の値をえらび, 厚さ 1.0 cm の値に換算し, 比重を乗じて計算による水分拡散係数 $\lambda_{cal.}$ を求めた。また同じ材料を用いて 3.1 に示した従来の方法によつて (塩類には $Pb(NO_3)_2$ と KBr を使用) 水分拡散係数 λ_0 を求めて (厚さ 1.0 cm) これらを Tab. 6 に示した。これをみると, $\lambda_{cal.}$ が λ_0 にほぼ近いものもあれば, かなりはなれているものもある。この場合, K_0 の値は乾湿球温度差によつて異なつた値を示しているのので, その比較する条件によつてもは 1.0 に近くもなり, はなれもするが, かりに比較する条件を決めても, すべての場合に $\lambda_{cal.}$ と λ_0 とが合致することはないようである。

(2) (2.5) で求めたいろいろな樹種の水分伝導度からそれぞれの比重を乗じてえた拡散係数の値 $\lambda_{cal.}$ を (3.1) でのべたこれら樹種にたいする水分拡散係数 λ -値と比較して Tab. 7 に示した。これを見て, よく合致したものもあれば, 合致しないものも多い。この場合は両者の実験では同じ材料を用いてないので, これらを比較することは多少無理がある。

これらの結果からみれば, $K=100 \frac{\lambda}{r_0}$ の関係が実験的に成立するとはいいがたく, なかに成立しているのはむしろ偶然といわざるをえない。したがつて, 拡散係数から計算で水分伝導度を求めることは一般にはきわめて無理があり, 拡散方程式を用いる場合の水分伝導度 K の値には, λ_0 の値に比重を乗じたものでなく, 水分伝導度それ自体を実験的に求めた値を用い, しかも, そのときの材料の寸法, 乾燥条件に応じて換算しておかなければならない。

4. 恒率乾燥

4.1 恒率乾燥を表わす方程式

恒率乾燥における平均含水率と乾燥時間との関係は次式で表わされるが, この式は時間 t にたいして指数関数であるために厳密には恒率乾燥を示す式としては適當でないことをのべた¹⁹⁾。

$$u_m = u_0 + At + \frac{A}{K_1} \left(-\frac{l^2}{12} + \frac{8l^2}{\pi^4} e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t} \right) \dots\dots\dots (4.1)$$

しかしこの式が真に恒率乾燥を表わすためには e の項の指数 $K_1 \cdot t$ が t に応じて恒数であつてもよいものと解釈されるが, この場合には, K の値が t によつて変動しなければならないことになり, いずれにしても, この式が恒率乾燥を表わす式とみなすには, 多くの無理がともなうので, 適當な式ということとはできない。

一般に恒率乾燥の間に材の表面から dt 時間に蒸発する水分量 dw は, 乾燥条件の温度, 乾湿球温度差をそれぞれ $\theta^\circ C$, $\Delta\theta^\circ C$, そのときの水分蒸発係数を $k_\theta (g/cm^2 \cdot h \cdot ^\circ C)$ とすれば,

$$|dw| = 2A \cdot k_\theta \cdot \Delta\theta \cdot dt \dots\dots\dots (4.2)$$

(ただし A = 表面積 (cm^2))

で表わされ, この量を含水率であらわすと

$$|du| = \frac{100}{r_0} \cdot \frac{2}{l} \cdot k_\theta \cdot \Delta\theta \cdot dt \dots\dots\dots (4.3)$$

(ただし r_0 = 絶乾比重 (g/cm^3), l = 厚さ (cm))

となる。したがつて木材の含水率が, $u_n\%$ から $u_0\%$ にまで乾燥するのに t 時間を要したとすれば, この関係は次式で示され,

$$u_n - u_b = \frac{100}{r_0} \cdot \frac{2}{l} \cdot k_{\theta} \cdot \Delta\theta \cdot t \dots\dots\dots (4.4)$$

各因子の値を知れば、この期間の乾燥所要時間はこの式で計算することができる。

しかし恒率乾燥は表面含水率が繊維飽和点に低下するまで継続するものと考えられ、この期間 (t) を推定する必要がある。このためには、表面含水率の低下状況を知らなければならない。

表面含水率の低下にしても、水分蒸発が材の表面において行なわれるので、水分減少の状況を示す式としては (4.4) 式と同じ形で表わされるものと思われる。いま表面における含水率の低下についてのみ考えてみる。含水率の多い材が恒率乾燥を行なっている場合は、木材中の水分の蒸発が容器内の水と同じ速さで行なわれるものとみなされるが、恒率で乾燥されるかぎりには、木材中の水分移動は、きわめて速く、少なくとも表面から蒸発された量だけは内部から表面へ移動すると思われる。しかし、実際にはこの期間はきわめて短いものであり、材中の水分移動量は、とうてい表面からの蒸発量に追従することはできず、材の中には、いちじるしい水分傾斜の生ずることが考えられる。したがって、この期間中の平均含水率の低下は、(4.4) 式で表わされるが、表面の含水率低下はこれよりかなりはげしくならなければならない。しかし表面含水率の低下を考える場合でも、この式にふくまれている因子はすべて同じように考慮されなければならない。その数値もまた同じ値でなければならない。表面含水率の低下は、平均含水率低下より事実大きいので、この現象を説明するには、これらの因子のほかさらに別の係数を考慮にいれなければならないと考える。その因子を厚さ l に求めてみた。すなわち、この期間において蒸発すべき水分は、あたかも容器中にはいつている自由な形の水分とみなされ、これがちょうど蒸発しきつたときに、木材の乾燥は恒率から減率に移ると解釈される。それゆえ、恒率期間中の表面含水率だけの低下を考える場合に材の厚さは、蒸発が材の一面からのみ行なわれるとして、真の厚さ l/2 でなくて、このうちちょうど容器中の水の深さに相当する厚さで、真の厚さよりかなりうすいものと仮想される。ここに厚さ相当係数 $\beta (< 1.0)$ を仮定すれば、 $\beta \cdot l$ で与えられる厚さが恒率乾燥期間中の板の厚さに相当すると解釈することができる。したがって、表面含水率 u_s の低下は (4.4) 式の代わりに次式が適当であると考えられる。

$$u_{sn} - u_{sb} = \frac{100}{r_0} \cdot \frac{2}{\beta l} \cdot k_{\theta} \cdot \Delta\theta \cdot t \dots\dots\dots (4.5)$$

しかして、この β の値は次項で述べるごとく実験によつて求めることができる。

4.2 厚さ相当係数 “ β ” について

この係数の値を決めるためには、恒率乾燥のすすんでいる材について、表面含水率の低下する経過を直接測定する必要があるが、これは実際には、きわめて困難なことである。

これにかわる方法として考えられるのは、恒率乾燥が終了して減率の段階にはいると表面含水率が繊維飽和点以下になり、表面層においては、収縮がはじまるので、この現象をとらえる方法である。この方法によつて減率乾燥のはじまる時期を知ることができれば、恒率乾燥における表面含水率は、等速度で低下すると考えられるので、表面含水率の低下経過を求めることができるはずである。このために次の実験を試みて、 β の値を求めた。

4.2.1 実験方法

実験装置は、Fig. 10 に示したごとく、小型の恒温恒湿器 (内法: 40×40×40[cm]) の中に、寸法 10×

10〔cm〕で厚さ 2, 4 cm の同一材料からとつた 2 個の供試片をいれて、温度 50°C、乾球温度差 10°C の条件で乾燥させた。本来ならば、1 つの供試片で重量の減少経過と同時に表面の収縮過程を測定しなければならないが、これは実施することができないため、この両者を別個の供試片とし、できるかぎり同じ条件を保つよう同じ材料から採材し、同じく処理したものをえらんだ。その 1 個の供試片は三桿天秤につるして重量の減少経過を測定し、他の供試片はその表面に 2 点を標示して恒温恒湿器のガラス扉に近づけ、この 2 点間距離を精度 1/20 mm の読取顕微鏡で一定時間ごとに測定し、収縮のはじまる時期を求めた。これと同時に、減率の段階になると材の表面温度が上昇するので、材の表面温度と乾球温度との差を測定して恒率乾燥の末期を知る参考とした。

供試片は生材であるが、さらに水中に置いて、できるだけ含水率を高くし、実験の直前に木材内部の温度が実験する時の温度 50°C になるまで、50°C よりやや高い温水に置いておき、実験開始と同時に恒率乾燥の過程にはいれるように考慮した。

なおこの実験に用いた樹種は、とりあえずブナで試み、さらに、スギ、イタヤカエデ、カツラなどについても 1 回ずつ試みた。

4.2.2 実験結果

供試材の平均含水率の減少経過、表面における 2 標点間距離の変化および乾球温度と材の表面温度との差の経過などの一例を Fig. 11 に示した。

これによると、標点間の長さおよび温度差は、あきらかにある時間（数時間）だけは一定であるが、それをすぎると、時間とともに減少するのがみとめられ、恒率乾燥から減率乾燥へ移行する時刻をよく推察することができた。また標点間距離の短くなるのと表面温度の上昇するのは、時間的によく一致しているのも認められる。同図において、概略的には恒率の間は標点間距離が一定であつて、横軸に平行な線であらわされ減率の段階になるとほぼ直線的に減少し、横軸にたいしある角度の直線で示されるので、これら 2 線の交点に相応する時刻が、恒率から減率へ移行する時とみなされる。このときの表面含水率がちょうど繊維飽和点であると考えられるが、繊維飽和

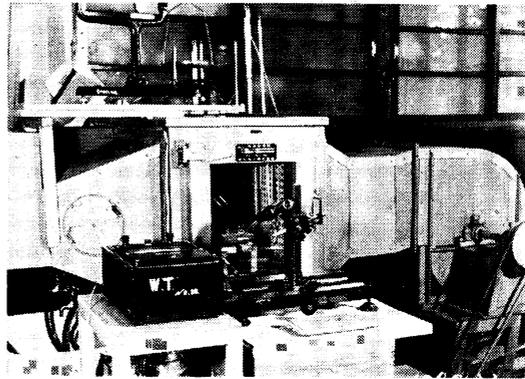


Fig. 10 β -値測定実験装置
Experimental apparatus of measuring β -value

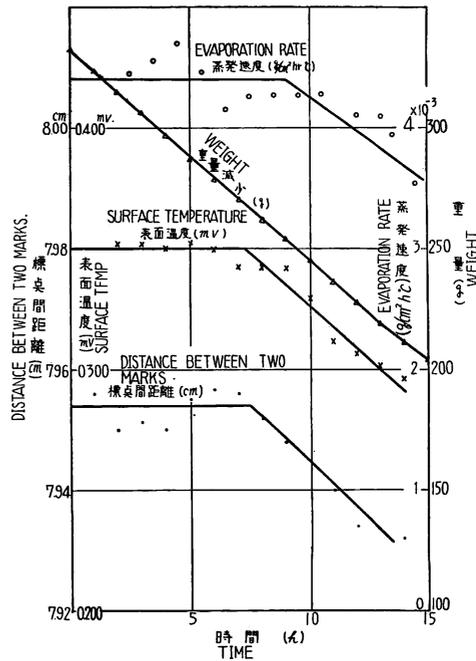


Fig. 11 重量、標点間距離、表面温度などの変化
Variation of weight, distance between two marks and surface temperature with time, dry bulb 50°C, wet bulb 46°C, Beech, sapwood plainsawed of 4 cm thick

点も従来の研究によるとけつして一定値ではなく、樹種によりことなるものとみなされている。しかし、ここではこの問題をそれほど厳密に考える必要もなく繊維飽和点の含水率を 30% であるとみなした。また、実験を開始したときの表面含水率については、木材内部に水分分布はなく、表面も内部も全く同一の含水率をもっていると仮定し、初期の平均含水率をもつて、そのときの表面含水率とみなした。このような仮定をみとめると (4.4) 式と (4.5) 式とから β の値は次のように簡単に求めることができる。

$$\beta = \frac{u_a - u_b}{u_{sa} - u_{sb}} = \frac{\Delta u}{\Delta u_s} \dots \dots \dots (4.6)$$

ただし、 $u_a = u_{sa}$, $u_{sb} = 30\%$ (繊維飽和点)

$u_b = u_{sb}$ が 30% になつたときの平均含水率

ここで求めた β 値を一括して Tab. 8 に示した。これによると、ブナにたいしては $\beta = 0.4$ であるとみなされ、しかも板の厚さには、関係しないように思われる。しかし、実験をした樹種もごく限られ、実験数量もきわめて少ないために確定的なことはまだいふことはできない。Tab. 8 の結果はただ実験の一例にすぎず、この数値に関するすべての問題は今後に残されているといわなければならない。

Table 8. β 値測定結果
 β -values obtained

No.	樹種 Species	比重 Sp. grv. g/cm ³	厚さ Thick-ness cm	初期含水率 Initial mois- ture content %	乾球 温度 Dry bulb °C	乾湿球 温度差 Wet bulb depr. °C	恒 率 期 間 Period of const. rate hrs.	Δu_m %	Δu_s %	β	平均値 Means
1	ブナ, 辺材, 板目 Beech, sapwood, plainsawed	0.63	2.0	120.0	50.0	10.0	5.0	35.4	90.0	0.39	0.39
2	ブナ, 辺材, 板目 Beech, sapwood, plainsawed	0.635	4.0	103.0	50.0	10.0	7.5	29.0	73.0	0.40	
3	ブナ, 偽心材, 板目 Beech, falseheart, plainsawed	0.63	5.0	100.0	50.0	10.0	7.0	20.0	70.0	0.29	
4	ブナ, 偽心材, 板目 Beech, falseheart, plainsawed	0.67	5.0	91.0	50.0	5.0	25.0	18.0	61.0	0.30	
5	ブナ, 辺材, 板目 Beech, sapwood, plainsawed	0.63	2.0	115.0	50.0	5.0	13.0	48.0	85.0	0.56	
6	スギ, 辺材, 板目 Cryptomeria, sapwood, flatgrained	0.37	5.0	116.0	50.0	4.0	35.0	30.0	86.0	0.35	0.35
7	イタヤカエデ 辺材, 板目 Painted maple, sapwood, plainsawed	0.59	2.0	125.0	50.0	5.0	21.5	80.5	95.0	0.83	0.83
8	カツラ, 辺材, 板目 Katsura, sapwood, plainsawed	0.40	2.0	199.0	50.0	5.0	23.0	129.0	169.0	0.76	0.76

4.3 恒率乾燥の所要時間の算定

さきに述べたとおり、恒率乾燥における平均含水率の低下する経過は(4.4)式で与えられ、表面含水率の経過も(4.5)式で知ることができるので、これらの式で恒率乾燥を示す時間が求められる。

したがって、まず(4.5)式で表面含水率が繊維飽和点に達するまでの時間、すなわち恒率乾燥を示す期間を求め、ついで(4.4)式によつてこの期間に応ずる含水率を求めると、これが恒率乾燥末期の含水率となるわけである。

また乾燥進行中の木材の水分分布は一般に正弦曲線で表わされ、表面および中心部の含水率と平均含水率との間には次の関係にあるとみとめられるので、恒率乾燥末期の平均含水率 u_m を知れば、中心部含水率を知ることもしめる。

$$u_c = \frac{\pi}{2} u_m - \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) u_F \dots\dots\dots (4.7)$$

ただし、 u_c = 中心部の含水率、 u_F = 恒率乾燥末期の表面含水率 (30%)

恒率乾燥の所要時間は、上述のように(4.4)式と(4.5)式を用いて計算によつて求められるが、実用的には煩雑であるので、Fig. 12 を作図して実用の便に供した。この図表は、まず表面含水率が繊維飽和点

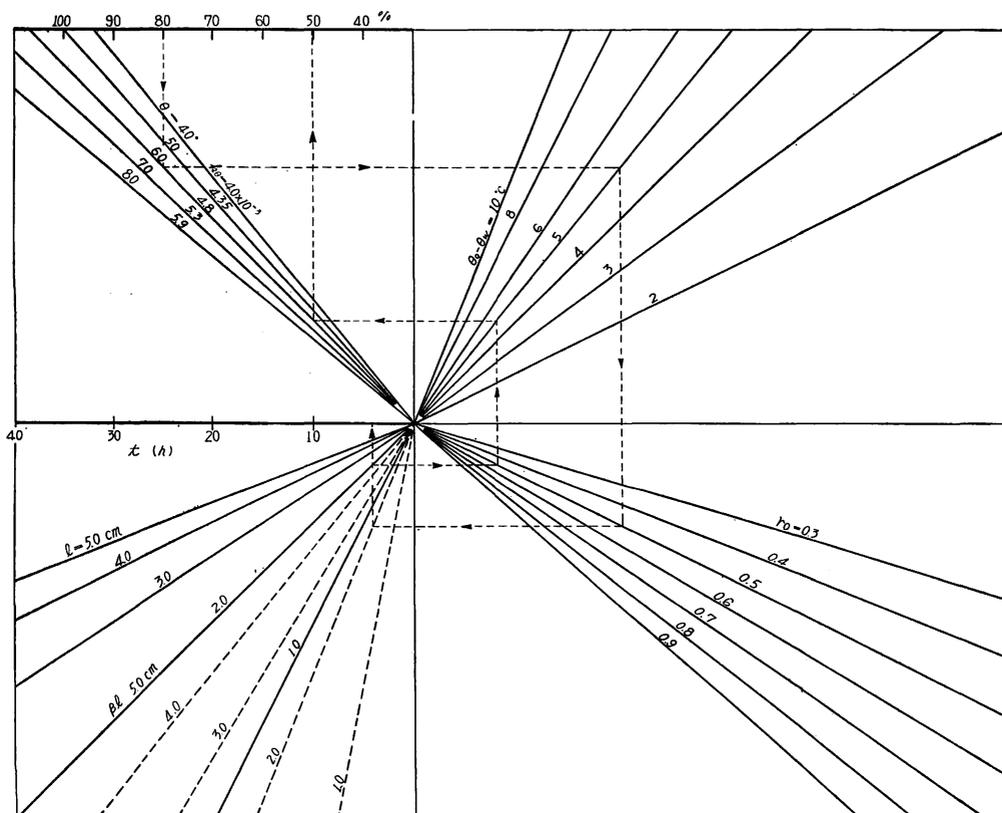


Fig. 12 恒率乾燥の所要時間と平均含水率との計算図表
Calculating chart of time in constant rate of drying and mean
moisture content at the end of constant rate of drying

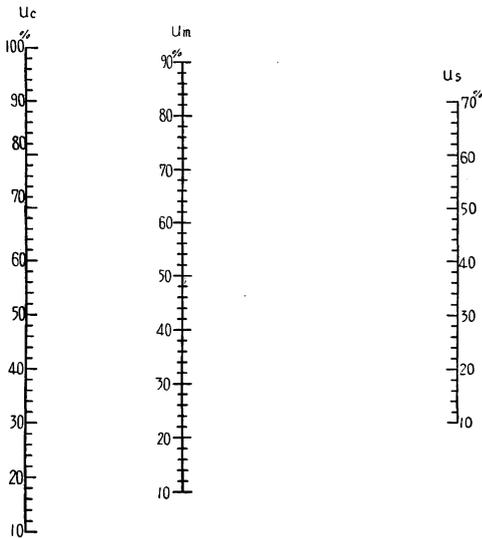


Fig. 13 平均含水率，表面含水率，中心含水率の関係図
Nomograph of mean-, surface- and center-moisture content

になるまでの時間を乾湿球温度差 $\Delta\theta$ ，表面蒸発係数 $k\theta$ ，比重および厚さ (βl) などを順序に考慮して求め，ついでこの時間における平均含水率をちよとこれと逆の経路をへて知ることができる。

また，このときの中心含水率は (4.7) 式で求められるが，Fig. 13 の計算図表を用いるとさらに簡単である。

5. 第 1 減率乾燥

5.1 第 1 減率乾燥を表わす方程式

第 1 減率乾燥における平均含水率の減少経過はすでに報告したが¹²⁾，この場合の解は初期条件を恒率乾燥末期の水分分布状態とし，求められたものである。しかし前節で述べたように恒率乾燥の経過は水分拡散方程式から求めたものは適当でない

と思われるので，ここではその解をそのまま適用せず，他の方法で求めた解を利用しなければならない。

前節に記したように恒率乾燥の末期では，中心部含水率を求めることができるし，そのときの表面含水率はちよと繊維飽和点に達しているときとみなすことができるので，初期条件としての水分分布 $F(x)$ を次のごとくすることができる。

$$F(x) = u_F + (u_c - u_F) \sin \frac{\pi}{l} x \dots\dots\dots (5.1)$$

ただし， u_F = 表面含水率の繊維飽和点， u_c = 中心部含水率

すなわち，水分拡散方程式 $\frac{\partial u}{\partial t} = K_2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ において

$$\left. \begin{array}{l} \text{境界条件} \quad x=0 \quad u = be^{-ct} + u_c = u_s = \phi(t) \\ \quad \quad \quad x=l \quad u = be^{-ct} + u_c = u_s = \phi(t) \\ \text{初期条件} \quad t=0 \quad u = F(x) = u_F + (u_c - u_F) \sin \frac{\pi}{l} x \end{array} \right\} \dots\dots\dots (5.2)$$

として，その解を求めた。その結果は複雑な式であるが，付録 (156 頁) に示したように，近似的な実験的性格の水分分布を示す式として，次のごとき式をえることができる。

$$u = u_s + \left\{ \frac{4}{\pi} (u_F - u_c) + (u_c - u_F) \right\} e^{-K_2 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \cdot \sin \frac{\pi}{l} x \dots\dots\dots (5.3)$$

したがって，平均含水率は次の式であらわされ，これを第 1 減率乾燥の経過を与える式として用いる。

$$u_m = \frac{2}{l} \int_0^{\frac{l}{2}} u \cdot dx$$

$$= u_s + \frac{8}{\pi^2} \left\{ (u_F - u_e) + \frac{\pi}{4} (u_e - u_F) \right\} e^{-K_2 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \dots\dots\dots (5.4)$$

5.2 表面含水率の減少経過

(5.4) 式において水分伝導度 K_2 の値とある時刻にたいする表面含水率を知れば、平均含水率と時間の関係を求めることができる。しかし、一般の乾燥過程においては、この第1減率乾燥の末期はまだ乾燥の経過中であつて、予定している乾燥終局の含水率に達していないのが常である。この研究では人工乾燥において所望の含水率にまで乾燥させるのに要する時間を求めることであるから、第1減率乾燥の各時刻にたいする平均含水率を知ろうとすることより、むしろ、この段階の末期における平均含水率を知ることが必要である。このためには、第1減率乾燥の期間のうちに表面含水率が繊維飽和点からそのときの乾燥条件に応ずる平衡含水率に達するまでの時間を知らなければならない。

恒率乾燥での表面含水率の低下は(4.5)式で表わされることを述べたが、この式の蒸発係数 k_0 の代わりに k_p を用いると次のようにかきかえることができる。

$$u_{s1} - u_{s0} = \frac{100}{r_0} \cdot \frac{2}{\beta l} \cdot k_p \cdot \Delta p \cdot t \dots\dots\dots (5.5)$$

減率乾燥にたいしては、蒸発抵抗圧 P_r の概念をいれるとよく理解できることもすでに報告した¹⁰⁾。この概念をここにふたたび応用すれば、減率乾燥における表面含水率の低下状態は次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} u_s &= u_F - \frac{100}{r_0} \cdot \frac{2}{\beta l} \cdot k_p (\Delta p - p_r) t \\ &= u_F - \frac{100}{r_0} \cdot \frac{2}{\beta l} k_p (p_w - p_0 - p_r) t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.6)$$

ただし、 u_F = 繊維飽和点に応ずる含水率

ここで問題になるのは、厚さ相当係数 β の値である。この値は恒率乾燥において乾燥している材には、水分傾斜がはなはだしいから考慮しなければならない係数であつた。したがつて乾燥が進行して減率段階にはいると、 β にたいして仮定した意義は失われてくる。すなわち、木材の表面における蒸発量が内部からの移動量によつて完全に制限され、そのときの条件に応じて可能な蒸発量以下である場合には当然 $\beta = 1.0$ となるべきであり、減率乾燥の段階においては表面の蒸発関係はこのような状態に近くなつていくとみなすことができるので、この場合にも $\beta = 1.0$ とみなした。

また、蒸発抵抗圧 P_r は前にも報告したように¹⁰⁾、一般に次の関係があるから、

$$P_r = a e^{-b u_s} \dots\dots\dots (5.7)$$

表面含水率は次のように表わすことができる。

$$u_s = u_F - \underbrace{\frac{100}{r_0} \cdot \frac{2}{l} \cdot k_p (p_w - p_0 - p_r)}_m \cdot t \dots\dots\dots (5.8)$$

$$= u_F - m (\Delta p - a e^{-b u_s}) \cdot t \dots\dots\dots (5.9)$$

したがつて、表面の含水率が u_F から u_s にまで低下するに要する時間 t は、

$$t = \int_{u_F}^{u_s} - \frac{du}{m(\Delta p - p_r)} \dots\dots\dots (5.10)$$

$$\begin{aligned}
 &= \int_{u_F}^{u_s} \frac{du}{m(\Delta p - ae^{-bu_s})} \\
 &= \frac{1}{m \cdot \Delta p \cdot b} \left[b(u_F - u_s) + \log \frac{\Delta p}{\Delta p - p_r} \right] \dots \dots \dots (5.11)
 \end{aligned}$$

与えられる。乾燥するための条件が与えられると、それに応じて、 Δp , p_r , m , b などが既知になるので、 u_s と t の関係は求めておくことができる。

一方第 1 減率の段階における表面含水率は一般に指数曲線的に減少して、ほぼそのときの条件に応ずる平衡含水率 u_e に到達すると考えられるので、次のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned}
 u_s &= U_F e^{-ct} + u_e \\
 U_s &= U_F e^{-ct}
 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5.12)$$

ただし $U_F = u_F - u_e$

この式はきわめて簡単な式であり、かりに C -値をいろいろの条件にたいして決めておくことができれば、表面含水率の低下を求める上に便利である。ところが、上述の (5.8) 式において乾燥すべき材料および乾燥条件を与えると u_s と t の関係を求めることができるので、この関係を (5.12) 式に入れて計算すると、それらの条件に応じて、 C の値を求めておくことができる。Fig. 14 はこれらの乾燥条件にたいして C -値を求める図表で、この左の部分は温度 $40 \sim 80^\circ\text{C}$ の各温度に応ずる乾湿球温度差 10°C のときの比重ごとの C -値であり、乾湿球温度差にたいして換算でき、右の部分でこの値をさらに、板厚に応じて

求められるようになっている。たとえば、同図に点線で示してあるのは、温度 65°C 、乾湿球温度差 5°C 、比重 0.45、板の厚さ 3.0 cm にたいする値でこのときの C -値は 0.36 である。この図を利用すればその概略値を求めることができる。

かくて、乾燥条件に応ずる C -値を仮定することができれば、(5.12) 式によつてその条件による表面含水率の低下する経過を推定することができることになる。

5.3 第 1 減率乾燥の所要時間の算定

この段階における乾燥は、表面含水率が繊維飽和点からその時の乾燥条件にたいする平衡含水率に到達するまでのものであるから、その所要時間は (5.11) 式によつて求めることができる。しかしこの式を用いて計算することは煩雑であるので、Fig. 15 にこの計算図表を示した。これは温度 60°C 、比重 0.5、厚さ $l=2.0\text{ cm}$ の材がい

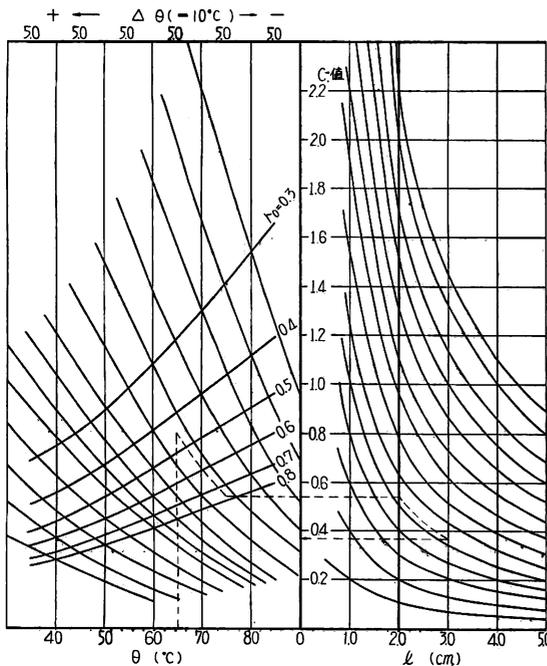


Fig. 14 乾燥条件にたいする C -値図表
C-value diagram for various
drying conditions

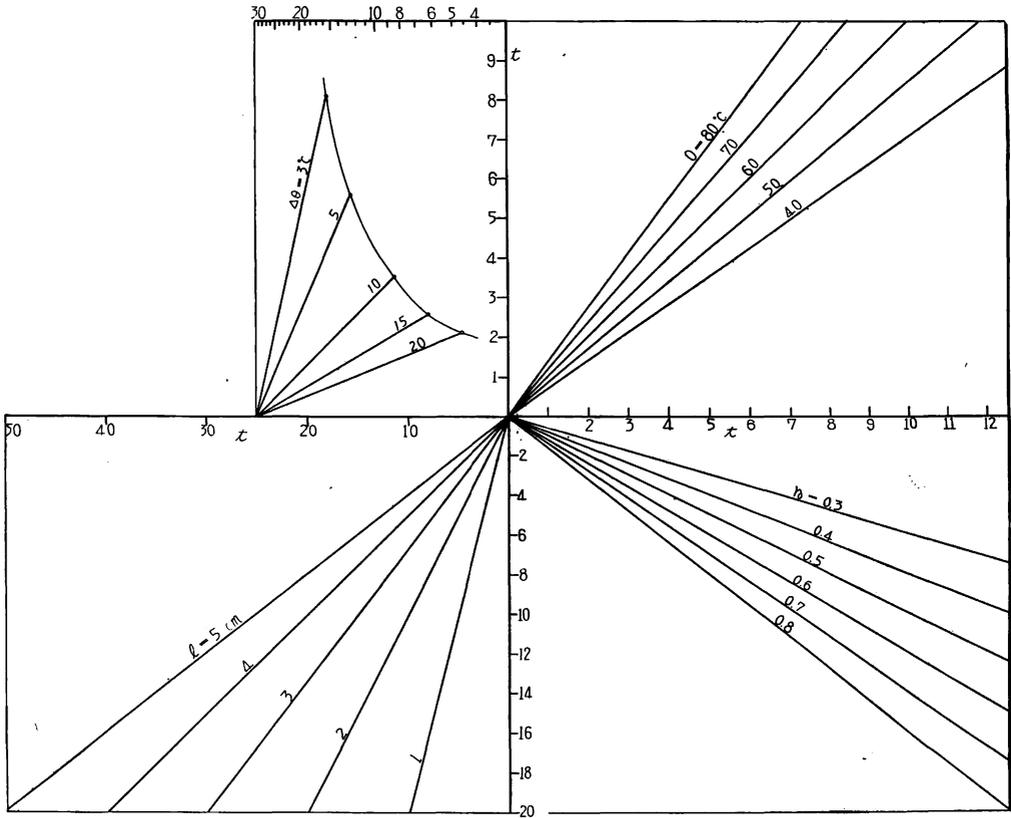


Fig. 15 第1減率乾燥時間の計算図表
Calculating chart for time in first decreasing rate of drying

ろいろの乾湿球温度差の条件において、その表面含水率の繊維飽和点からそのときの条件に平衡するまでの所要時間を基準として、作図したもので、これにその時の温度、材料の比重と厚さにたいして換算のできるように作られている。

また、第1減率乾燥の末期における平均含水率は(5.4)式によつて計算することができるが、これにたいしても Fig. 16 のように計算図表を作成した。この図表では、まず恒率乾燥の末期における平均含水率 (u_{m1}) と、そのときの乾燥条件、すなわちこの条件に相応する平衡含水率 u_e 、および、さきに Fig. 15 で求めた、表面含水率がそのときの平衡含水率に達するまでの時間、などによつて、その到達すべき平均含水率を求め、これを水分伝導度 K および板の厚さに応じて換算するように作られている。ただこの場合、問題になるのは、水分伝導度 K_2 の値であつて、前述したように¹²⁾この段階の水分伝導度の値は、第2減率乾燥の場合の値ほど安定したものでなく、またこの確固とした値を求めることもできないので、この場合は概略の乾燥時間を求めることが主目的であるから、第2減率乾燥時の値を用いることにして、これによりすべての作図が行なわれている。

6. 第2減率乾燥

6.1 第2減率乾燥を表わす方程式

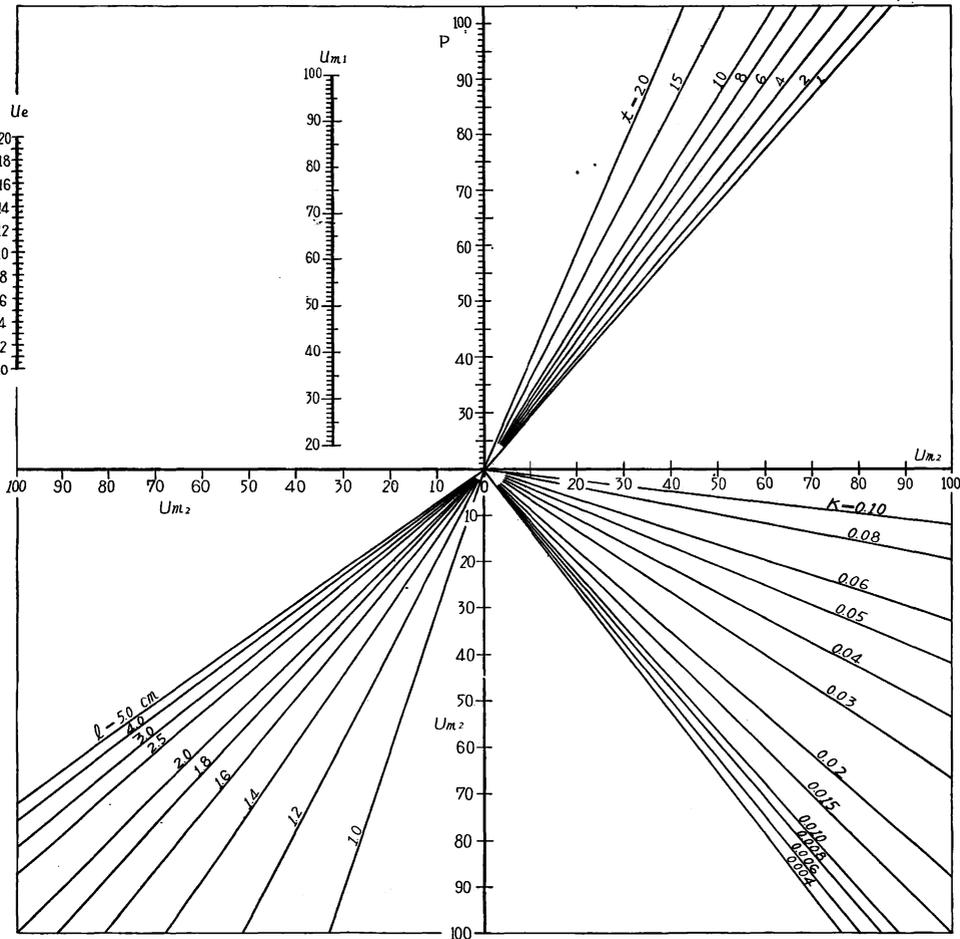


Fig. 16 第 1 減率乾燥末期の平均含水率算定図表
Calculating chart for mean moisture content at the end
of first decreasing rate of drying

この時期の乾燥については、すでに報告したように¹²⁾、表面の含水率がそのときの乾燥条件にたいする平衡含水率にはぼ達しているとみなして、水分拡散方程式 $\frac{\partial u}{\partial t} = K_3 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ において、

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{境界条件: } x=0 \quad u=u_c \\
 \quad \quad \quad x=l \quad u=u_e \\
 \text{初期条件: } t=0 \quad u=F(x) = u_e + (u_c - u_e) \sin \frac{\pi}{l} x
 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (6.1)$$

とし、その解は近似的には次のごとくなり、

$$u = u_e + (u_c - u_e) \sin \frac{\pi}{l} x \cdot e^{-K_3 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \cdot t} \dots\dots\dots (6.2)$$

また、平均含水率は

$$u_m = u_e + \frac{2}{\pi} (u_r - u_e) e^{-K_3 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \cdot t} \dots\dots\dots (6.3)$$

で表わすことができる。

(6.3) 式において K_3 , l , u_e および u_r を知れば, 各時刻にたいする平均含水率 u_m を知ることができ, 乾燥に要する時間を求めることができる。

この場合 u_r は第1減率乾燥末期における中心部の含水率であるが, 一般に水分分布が, たびたび仮定されてきたように \sin 曲線をなしているとすれば, u_r は第1減率乾燥末期の平均含水率, 換言すると第2減率乾燥当初の平均含水率 u_{m2} と u_e との間に次の関係*1にあるので,

$$\left. \begin{aligned} u_{m2} &= u_e + \frac{2}{\pi} (u_r - u_e) \\ \text{または} \quad u_r &= u_e + \frac{\pi}{2} (u_{m2} - u_e) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.4)$$

(6.3) 式は次のように表わされる。

$$u_m = u_e + (u_{m2} - u_e) e^{-K_3 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \cdot t} \dots\dots\dots (6.5)$$

6.2 第2減率乾燥の所要時間の算定

第2減率乾燥における時間は(6.5)式によつて, 樹種にたいする K_3 の値と乾燥条件とが与えられれば求めることができる。しかも K_3 の値は乾燥条件にたいして安定しているので, 十分の信頼度で応用することができよう。

Fig. 17 は(6.5)式にたいする計算図表で, 第2減率の段階になつたときの平均含水率, およびそのときの乾燥条件にたいする平衡含水率, とから到達させるべき所望の含水率になるまでの時間を知り, これを樹種(比重)や板の厚さに応じて求められるように, 作図されたものである。この場合の水分伝導度 K_3 の値はそのときの乾燥条件である温度や乾湿球温度差などによつて影響をうけ, これらの関係についてはすでに Fig. 6 で示した係数を用いて所望の乾燥条件にたいして補正することができる。ただこのような乾燥条件にたいする K_3 -値の影響がどの樹種にたいしても同じであるかは疑問で, 今後の検討を要する問題であるが, ここではこれらが同じ関係にあるものと仮定しておいた。また, 樹種にたいする K_3 -値は前述した Tab. 4 を用いればよい。これらの図表を併用して第2減率乾燥に要する時間を算出することができる。

7. 木材乾燥の実測時間と図表による推定時間との比較

今まで述べてきた図表を利用して推定した乾燥時間が, 実際の乾燥時間とどの程度に合致するかを検討

*1
$$u = u_e + (u_r - u_e) \sin \frac{\pi}{l} x$$

$$u_m = \frac{2}{l} \left[\int_0^{\frac{l}{2}} u_e \cdot dx + \int_0^{\frac{l}{2}} (u_r - u_e) \sin \frac{\pi}{l} x \cdot dx \right]$$

$$= u_e + \frac{2}{\pi} (u_r - u_e)$$

または
$$u_r = u_e + \frac{\pi}{2} (u_m - u_e)$$

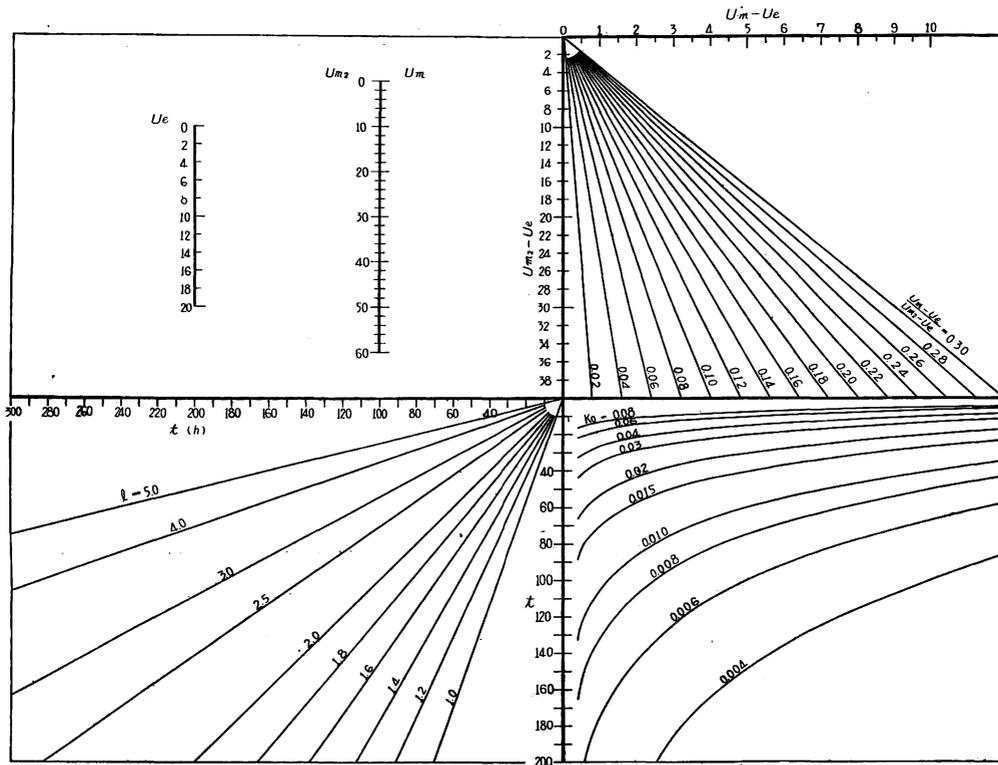


Fig. 17 第 2 減率乾燥時間の計算図表
Calculating chart for time in second decreasing rate of drying

してみたい。これにはすでに発表されている乾燥の実験結果をえらんで、比較の対称とした。この結果を一括して Tab. 9 に示した。

これらには、初期含水率が多くて恒率、第 1 減率をへて第 2 減率乾燥にいたるすべての乾燥の段階をふくむもの、恒率乾燥の時期をかくもの、恒率と第 1 減率乾燥をかくものなど、いろいろの場合がふくまれているが、すべてそれぞれの条件をあてはめて各段階ごとに計算したもの例である。また、実際の人工乾燥のように乾燥のすすむにつれて、温、湿度の条件をかえている場合には、同じ第 2 減率の段階でも乾燥条件をそれに応じてがえ、なるべく実際のとおりに区分して計算を行なつた。この表の中には、全体の乾燥時間はほとんど一致していても、その各段階における時間の異なるものもあり、両者ともよく一致したもの、しからざるものなど、区々である。これらのうちとくに第 2 減率乾燥において合致していないのは、適用した水分伝導度の値が適当でなかつたためと考えられる。これは同じ樹種でも個体によつて乾燥経過のいちじるしく相違するものもあり、さけることのできないことであろう。また、恒率乾燥における乾燥時間の計算では、 β の値を 0.4 として作図してあるが、この値が樹種をとわず同じ値であると仮定したところは問題であり、樹種によつてことなる値をとるべきものと考えられる。適当な β の値を知ることができれば、恒率乾燥でもよく一致する結果がえられることであろう。いずれにしても、いままで求めてきた実験の結果にもとづいて作成した図表から、適当な数値さえ用いられば、乾燥時間の推定もよく一致するとは思われるが、要はこのような方法によれば乾燥条件さえ与えると必要な乾燥時間を推定する

Table 9. 乾燥時間の実測値と計算値との比較表
Comparison of drying period calculated by equations with that observed

樹種 Species	比重 Sp. gr. g/cm ³	厚さ Thick- ness cm	初期 含水率 Initial moisture content %	最終 含水率 End moisture content %	温度 Temp. °C	乾湿球 温度差 Wet bulb dep. °C	実測 Observed		計算 Calculated				備考 Remarks
							乾燥時間 Drying period h	備考 Remarks	恒率 Constant rate	第1減率 1st decreasing rate	第2減率 2nd decreasing rate	合計 Total h	
ヒノキ <i>Chamaecyparis obtusa</i>	0.40	2.15	19.5	8.0	60.0	25.0	37.0	実験番号 A-30-1 の資料			27.5		$K_0=1.47 \times 10^{-2}$
カツラ <i>Cercidiphyllum japonicum</i>	0.46	2.20	27.4	10.0	//	//	42.0	A-12-2			43.5		$K_0=0.915 \times 10^{-2}$
シオジ <i>Fraxinus spethiana</i>	0.51	2.20	23.4	8.0	//	//	45.0	A-2-2			43.0		$K_0=1.17 \times 10^{-2}$
ブナ 辺材床板 <i>Fagus crenata</i> Sapwood Flooring	0.65	2.15	90.0	10.0	//	3.0~25.0	54.0	林試報 No. 81 p. 89 Fig. 15	$\Delta\theta=3^\circ\text{C}$ 90~54% 11.0 h	$\Delta\theta=4.5^\circ\text{C}$ 54~37% 8.5 h	$\Delta\theta=13^\circ\text{C}$ 37~18% 22.0 h $\Delta\theta=25^\circ\text{C}$ 18~10% 16.5 h	58.0	$K_0=1.2 \times 10^{-2}$ $K_3=1.45 \times 10^{-2}$ $K_3=1.56 \times 10^{-2}$
ナラ 吋板(心材) <i>Quercus mongolica</i> Heartwood, Inchboard	0.66	2.80	70.0	10.0	//	3.0~25.0	210.0	// p. 90 Fig. 17		$\Delta\theta=3.0$ 70~53.8 15.0 h	$\Delta\theta=7.0$ 53.8~30.0% 75.0 h $\Delta\theta=15.0$ 30.0~15.0% 72.0 h $\Delta\theta=20.0$ 15.0~10.0% 47.0 h	209.0	$K_2=0.8 \times 10^{-2}$ $K_3=0.5 \times 10^{-2}$ $K_3=0.66 \times 10^{-2}$ $K_3=0.69 \times 10^{-2}$
ブナ 辺材, 床板 <i>Fagus crenata</i> Sapwood Flooring	0.60	2.20	95.0	10.0	//	3.0, 15.0	69.0	BF-W-5	$\Delta\theta=3^\circ\text{C}$ 95~56% 12.0 h	$\Delta\theta=3^\circ\text{C}$ 56~41.8% 10.4 h $\Delta\theta=15^\circ\text{C}$ 41.8~24.0% 5.5 h	$\Delta\theta=15^\circ\text{C}$ 24.0~10.0% 41.0 h	69.0	$K_0=1.3 \times 10^{-2}$ $K_2=1.0 \times 10^{-2}$ $K_2=1.3 \times 10^{-2}$ $K_3=1.3 \times 10^{-2}$

Table 9. (つづき) (Continued)

樹種 Species	比重 Sp. grv. g/cm ³	厚さ Thick- ness cm	初期 含水率 Initial moisture content %	最終 含水率 End moisture content %	温度 Temp. °C	乾湿球 温度差 Wet bulb dep. °C	実測 Observed		計 算 Calculated				備考 Remarks
							乾燥時間 Drying period h	備考 Remarks	恒率 Constant rate	第1減率 1st decreasing rate	第2減率 2nd decreasing rate	合計 Total h	
ナラ 板目, 床板 <i>Quercus mongolica</i> Flooring	0.65	2.20	50.0	8.5	60.0	5.0, 15.0	186.0	BN-O-20		$\Delta\theta=5^\circ\text{C}$ 50~36% 7.0 h	$\Delta\theta=5^\circ\text{C}$ 36~16.5% 96.0 h $\Delta\theta=15^\circ\text{C}$ 16.5~8.5% 64.0 h	167.0	$K_2=0.6\times 10^{-2}$ $K_3=0.6\times 10^{-2}$ $K_3=0.8\times 10^{-2}$
ナラ <i>Quercus mongolica</i>	0.65	2.40	75.0	15.0	55.0 ~60.0	3.0~17.0	207.0	徳林指報 No. 1 p. 67 Fig. 12		$\Delta\theta=3^\circ\text{C}$ 75.0~61.0% 14.2 h	$\Delta\theta=3^\circ\text{C}$ 61.0~45% 59.0 h $\Delta\theta=7^\circ\text{C}$ 48.0~32.0% 46.0 h $\Delta\theta=12^\circ\text{C}$ 32.0~22.0% 41.0 h 60°C $\Delta\theta=17^\circ\text{C}$ 22.0~15.0% 39.0 h	199.2	$K_0=0.45\times 10^{-2}$ $K_2=0.34\times 10^{-2}$ $K_3=0.34\times 10^{-2}$ $K_3=0.52\times 10^{-2}$ $K^3=0.61\times 10^{-2}$
カツラ <i>Cercidypyllum japonicum</i>	0.43	1.30	70.0	10.0	60.0	5.0, 8.0 15.0	32.0	p. 67 Fig. 13		$\Delta\theta=5^\circ\text{C}$ 70.0~41.0% 3.2 h	$\Delta\theta=5^\circ\text{C}$ 41.0~28.0% 7.0 h $\Delta\theta=8^\circ\text{C}$ 28.0~17.0% 9.5 h $\Delta\theta=15^\circ\text{C}$ 17.0~10.0% 9.0 h	28.7	$K_0=1.35\times 10^{-2}$ $K_2=1.26\times 10^{-2}$ $K_3=1.26\times 10^{-2}$ $K_3=1.47\times 10^{-2}$ $K_3=1.78\times 10^{-2}$
ブナ <i>Fagus crenata</i>	0.67	5.0	91.0	31.5	50.0	5.0	180.0	林試報 No. 54 p. 184 Table 3 No. 2		$\Delta\theta=5^\circ\text{C}$ 91.0~69.9 29.7 h	$\Delta\theta=5^\circ\text{C}$ 69.9~48.3% 22.1 h	148.8	$K_2=0.944\times 10^{-2}$ $K_3=0.805\times 10^{-2}$ $\beta=0.65$
ブナ <i>Fagus crenata</i>	0.59	5.0	100.0	15.5	//	//	180.0	// p. 184 Table 3 No. 3		$\Delta\theta=5^\circ\text{C}$ 100~ 76.1% 30.5 h	$\Delta\theta=5^\circ\text{C}$ 76.1~39.3% 19.5 h	182.0	$K_2=2.9\times 10^{-2}$ $K_3=2.0\times 10^{-2}$ $\beta=0.65$

ことのできる見とおしをえたにすぎず、今後の研究によつて、さらに正確な推定の可能を望むものである。

8. 乾燥速度の計算図表

木材の人工乾燥操作において、乾燥室内の条件にたいする木材水分の減少速度、すなわち乾燥速度を知る必要のある場合がある。たとえば、乾燥スケジュールにしたがつて乾燥を行なつているとき、その乾燥条件をかえる時期を乾燥速度がいちじるしく低下したときにしたい場合、あるいは第2減率乾燥の段階においてなるべく同じ乾燥速度で乾燥させるように乾燥条件をえらびたいとき、などである。このために、恒率、減率の乾燥経過における乾燥速度を示す式から、その計算図表を作成したので、これらを示しておく。

8.1 恒率乾燥速度の図表

恒率乾燥における乾燥速度は(4.3)式から次のようにあらわされる。

$$\left| \frac{du}{dt} \right| = \frac{100}{r_0} \cdot \frac{2}{l} \cdot k_0 \cdot \Delta\theta \dots\dots\dots (8.1)$$

Fig. 18 はこれを図表化したものである。蒸発係数の k_0 は温度や乾湿球温度差、風速などにより影響をうけるので、これらを考慮の上、温度、乾湿球温度差、材の比重、厚さなどの因子によつて、乾燥速度の求められるようにしたものである(この場合の風速は約 1.0 m/s を仮定してある)。

8.2 減率乾燥速度の図表

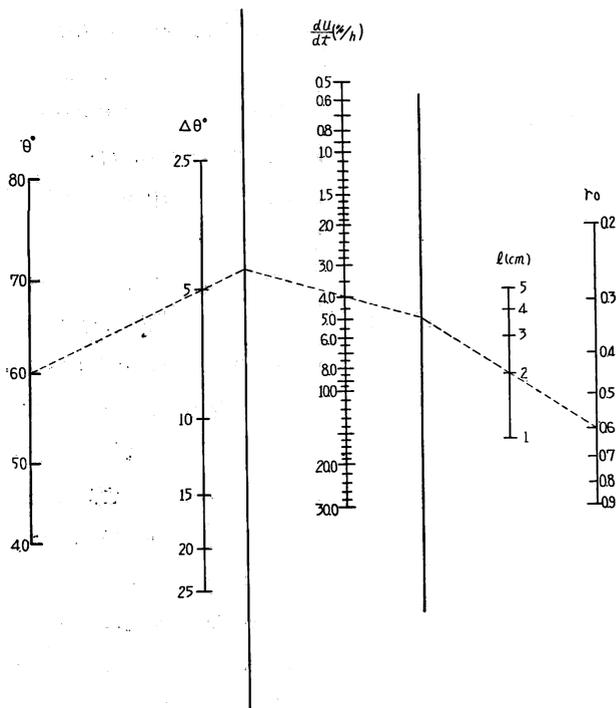


Fig. 18 恒率乾燥における乾燥速度の計算図表
Calculating chart for drying rate in constant rate of drying

減率乾燥における速度は付録でのべている第1減率段階では(21, 26, 31)式、第2減率は(36, 39, 42)式から計算することができる。しかし、すでにのべたように、第1減率乾燥における水分伝導度の値は安定したものとは見なされないの、第2減率の乾燥速度だけについて考えてみた。

この段階の乾燥速度はいずれの式から求めても

$$\left| \frac{dU_m}{dt} \right| = K_3 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 U_m \dots (8.2)$$

ただし U_m = 自由含水率
($u_m - u_e$)

で示され、板の厚さ、その条件に
応ずる水分伝導度 K_3 の値が与え
られれば、自由含水率に応ずる乾
燥速度は求められる。Fig. 19 は

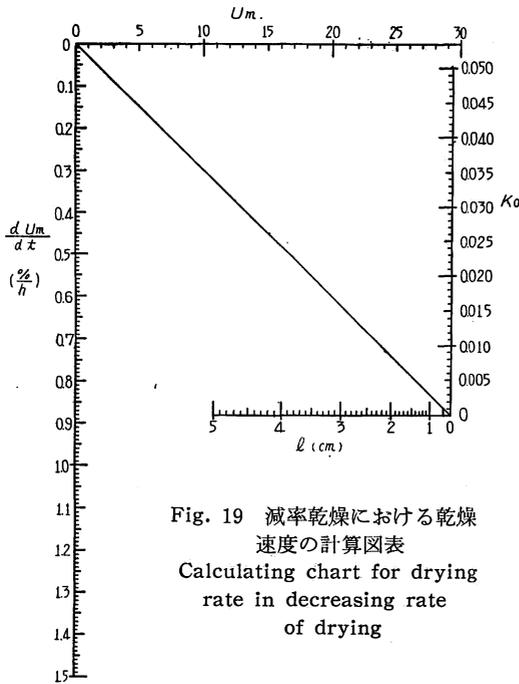


Fig. 19 減率乾燥における乾燥速度の計算図表
Calculating chart for drying rate in decreasing rate of drying

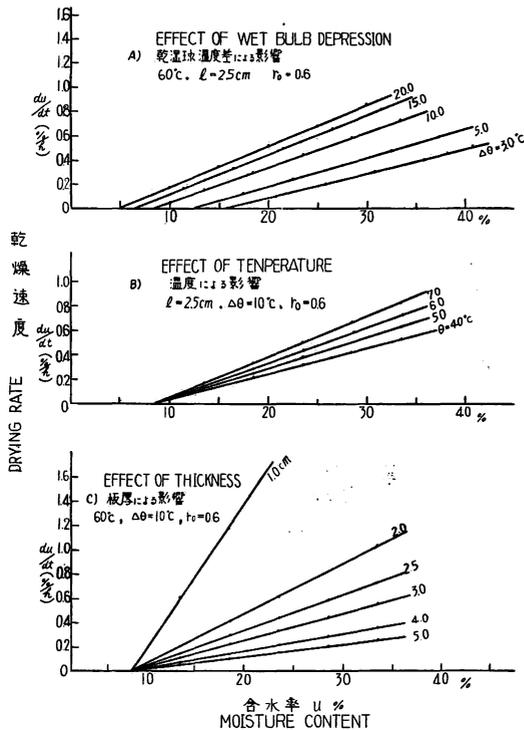


Fig. 20 乾燥速度の乾燥条件による影響
Effect of drying conditions on drying rate of wood

この計算図表である。自由含水率 U_m が 30% までしかないのは、この段階の乾燥経過は、自由含水率で、この範囲をこえることがないからである。この計算図表を用いて、乾燥速度がこれに作用する温度、乾湿球温度差、板の厚さなどによつて、どのように影響をうけるかを求めてみるのも意義のないことではない。Fig. 20 はこれらの関係を示したものである。

9. む す び

この研究は、木材中の水分移動が拡散方程式 $\left(\frac{\partial u}{\partial t} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)$ にしたがうものとして、表面蒸発から境界条件をもとめてこの方程式の解を求め、水分伝導度とそのときの条件に適合した値を用いれば、この解を用いて乾燥時間の推定できることをたしかめるとともに、水分拡散係数と水分伝導度との関係にも検討を加えてきた。また、木材水分の蒸発、内部拡散などの現象から、とくに木材の人工乾燥に要する時間を求めるために現在までの研究成果を中心にして一応の体系づけを試みたものである。

このなかには、いくつかの仮定、たとえば恒率乾燥における水分移動性を示す厚さ相当係数“ β ”、減率乾燥における蒸発抵抗圧“ P_r ”などがあり、実験の数も少なく、かなり独断的な考え方ではあるが、これらによつて乾燥現象の説明を試みてみた。また水分伝導度と拡散係数についても今後の研究にまつべきものが多いことはいうまでもない。この報告では、木材乾燥に関する研究について一つの方向が示されたにすぎず、むしろようやくその緒が見つけれられたにすぎないのである。今後のこの方面の研究進展になんらかの役に立てば幸せとするところである。

10. 摘 要

この研究は、乾燥条件と木材中の水分移動性との間の法則性を知り、これらによつて乾燥に必要な限界時間を知らうとして行なつてきたもので、この成果が木材乾燥技術に一つの到達すべき指標を与えることができると念じている。この一連の研究において、すでに木材中における水分の移動が、熱伝導式と同じ形の木材拡散方程式 $\frac{\partial u}{\partial t} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ にしたがうとして、これをとくための境界条件に表面含水率が減少する経過を適用し、恒率、第1減率、第2減率の各段階における解を求めてきた。この報告では、水分伝導度 K の乾燥条件による影響、さらに拡散係数との関係を明らかにした上で、条件に適した水分伝導度の値を用いれば、乾燥に必要な時間の算出は拡散方程式の解から、実用的には満足しうる程度で可能であることを明らかにし、さらにこの成果が広く実用に供されるように計算図表を作成したものである。その成果の主なものは次のとおりである。

(1) 水分伝導度 K の値は第2減率乾燥においては安定していることを見だし、材料や乾燥条件との間に次のごとく関係にあることを明らかにした。

- (i) 材料の厚さが厚くなるほど K の値は大きくなるので、常に同じ厚さについて比較しなければならない。
- (ii) K -値は木材乾燥において通常用いる温度 $40 \sim 80^\circ\text{C}$ の程度では、温度とともに比例的に増大する。
- (iii) 乾湿球温度差との関係は材料の厚さによつてことなり、ベニヤのごとく薄い材料では K -値は乾湿球温度差とともに大きくなるが、 2cm 以上の板材では乾湿球温度差 $15 \sim 20^\circ\text{C}$ まではそれとともに増大するが、それ以上ではかえつて減少する傾向にある。これは板が厚くなるほど表面硬化をおこすためと考えられる。
- (iv) 樹種との関係については Fig. 7 に示した結果をえた。実験した樹種も少ないが、重いものほど K -値は小さい傾向にある。しかし、 K -値はただ比重によつて決定されるものでなく、むしろ細胞膜壁の厚さなどが直接関係するもので、樹種による特性がうかがわれる。

(2) 拡散係数 λ の樹種ならびに乾燥条件による影響などは明らかにされているが、これらの関係は K -値の場合とは異なっている。 K と λ との間には $K = 100 \frac{\lambda}{r_0}$ の関係にあるが、 K と λ とをそれぞれ別個に求めた関係では、必ずしもこの上式の関係が成立するとはかぎらないことが認められた。

(3) 乾燥による平均含水率の低下する経過は拡散方程式 $\frac{\partial u}{\partial t} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ に表面含水率の減少状況を境界条件として用いてといた解によつて表わされることをのべてきたが、恒率乾燥はその解である方程式が恒率乾燥を表わすには矛盾があるので、乾燥速度が一定であることから求めた次式を適当なものとした。

$$u_a - u_b = \frac{100}{r_0} \cdot \frac{2}{l} \cdot k_0 \cdot \Delta\theta \cdot t \dots\dots\dots (1)$$

u = 含水率, l = 厚さ, k_0 = 蒸発係数, $\Delta\theta$ = 乾湿球温度差

恒率乾燥を示す期間 t を知るために次のごとく見解をとつた。

恒率乾燥は表面含水率が繊維飽和点に低下するまで継続するわけであるが、表面含水率の低下だけを考へてみても、上式と同じ形の式が成立するわけで、材の内部には当然水分傾斜が生ずるので、厚さ相当係数 β という因子を考へて、表面含水率の低下を示すのに次式を提唱した。

$$u_{sa} - u_{sb} = \frac{100}{r_0} \cdot \frac{2}{\beta l} \cdot k_{\theta} \cdot \Delta \theta \cdot t \dots\dots\dots(2)$$

この β の値は、恒率乾燥の期間だけに蒸発した水分量に相当する材の厚さであると解釈し、内部における水分の移動になんらの抵抗がなく、表面蒸発を常にその条件にたいして満度に行なうだけの内部からの水分移動があるときは水分移動にたいし全く抵抗のない場合で、このときは $\beta=0$ であり、表面蒸発が全く内部からの水分移動に規制される場合には（水分移動に抵抗のある場合） $\beta=1.0$ となるものとみなした。実験によつて β の値を求め、ブナ材にたいしては厚さにかかわらず $\beta=0.4$ をえた。しかし、 β の値に関してはまだ実験の数も少なく、数値についても今後の研究にまたなければならぬが、この係数を仮定することによつて、とくに自由水分の移動性を表わすことができると考えている。すなわち、木材水分の移動性は、たんに比重、厚さだけでは論ぜられないで、その材固有の特性があるため、(2) 式の分母である βl 、 βr_0 または $\beta l r_0$ などの総合的な因子によつて影響をうけるであろうという見解をもつた。

(4) 減率乾燥における表面含水率の低下も、(2) 式と同じ形で表わされるが、減率の段階では内部で移動した水分がすべて蒸発されるため $\beta=1.0$ とみなし、表面含水率の低下を次式で表わし、表面含水率が繊維飽和点からそのときの空気条件にたいする平衡含水率になるまでの時間 t の計算を可能にした。

$$U_S = U_F - \frac{100}{r_0} \cdot \frac{2}{l} \cdot k_p(p_w - p_0 - p_r) \cdot t \dots\dots\dots(3)$$

また、一般に乾燥経過は次式であらわされるので、(3) 式から求めた U_S と t との関係がそのまま (4)

$$U_S = U_F \times e^{-ct} \dots\dots\dots(4)$$

式にも適用されるとして乾燥条件にたいする常数 C の値を計算によつて求め、これを Fig. 14 のごとく図示しておき、表面含水率の低下経過の推定を容易にした。

(5) 恒率、第 1 減率、第 2 減率乾燥の所要時間はそれぞれ次のごとくして求めた。

(i) 恒率乾燥の所要時間はまず前述の (2) 式で恒率乾燥を示す時間を求め、(1) 式からその時間に応ずる含水率を求めれば、これがこの期間末期の平均含水率である。Fig. 12 はこれらの計算を省くために図表化したものである。

(ii) 第 1 減率乾燥は表面含水率が繊維飽和点からそのときの乾燥条件に応ずる平衡含水率に達するまでの期間で、その時間は (5.11) 式で示される。Fig. 15 はこれを図表化したもので、温度 60°C 、比重 0.5、厚さ $l=2.0\text{ cm}$ を基準にしてあり、これがそれぞれ他の条件にたいして換算できるように作られている。さらにこの時間を知れば (5.4) 式によりこの段階の末期含水率を求めることができるが、Fig. 16 はこれらの計算図表である。

(iii) 第 2 減率乾燥は (6.5) 式で与えられるが、この段階に達したときの含水率、乾燥条件にたいする平衡含水率、乾燥させるべき含水率、さらに、その樹種の水分伝導度 K_0 、厚さなどを知れば Fig. 17 から容易にその時間を求めることができる。

(6) すでに発表されている乾燥実験の実例における乾燥時間を、これらの計算図表によつて求めた結果と比較してみたが、Tab. 9 に示すように区々の結果がえられた。ただ、適当な水分伝導度 K_0 の値がえられればよく合致すると思われる。とくに第 2 減率乾燥においてはそうである。

(7) 恒率、第 2 減率乾燥の乾燥速度はそれぞれ (8.1) 式、(8.2) 式で示されるが、これらの計算図表を Fig. 18, 19 に示した。恒率乾燥速度は温度、乾湿球温度差、材の比重、厚さなどから求められる。

また、第2減率乾燥速度はそのときの含水率(自由含水率で示したもの)、水分伝導度、厚さなどから知ることができる。Fig. 20 にこれらを利用して各種条件にたいする乾燥速度を求めた例を示した。

〔付 録〕

水分拡散方程式の解

従来たびたび水分拡散方程式について報告してきたが、その境界条件や初期条件のいろいろな場合にたいする解を求めたので、重複する部分もあるがまとめて報告しておく。

水分拡散方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \dots\dots\dots (1)$$

をとくための境界条件および初期条件として次の式が成り立つとすれば、

$$\left. \begin{array}{l} x=0 \quad u=\varphi_1(t) \\ x=l \quad u=\varphi_2(t) \\ t=0 \quad u=f(x) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

その解は次のようになる。

$$u = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-K \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 t} \cdot \sin \frac{n\pi}{l} x \left\{ \int_0^l f(\lambda) \sin \frac{n\pi}{l} \lambda d\lambda + \frac{n\pi}{l} K \int_0^t e^{K \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \lambda} [\varphi_1(\lambda) - (-1)^n \varphi_2(\lambda)] d\lambda \right\} \dots\dots\dots (3)$$

1. 恒率乾燥

1.1 初期条件の水分分布が一様な場合

$$\frac{\partial u}{\partial t} = K_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{境界条件} \quad x=0 \quad u=u_0 - at = u_s \\ \quad \quad \quad x=l \quad u=u_0 - at = u_s \end{array} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ただし $u_s \geq 30\%$

$$\text{初期条件} \quad t=0 \quad u=u_0 \dots\dots\dots (6)$$

これらの条件を(3)式に代入すると

$$\int_0^l f(\lambda) \sin \frac{n\pi}{l} \lambda d\lambda = \frac{u_0 l}{n\pi} [1 - (-1)^n]$$

$$\int_0^t e^{K \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \lambda} [\varphi_1(\lambda) - (-1)^n \varphi_2(\lambda)] d\lambda = e^{\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 K_1 t} \times$$

$$\left\{ \frac{-a}{\left(\frac{n\pi}{l}\right)^4 K_1^2} \left[K_1 \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 t - 1 \right] + \frac{u_0}{\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 K_1} \right\} - \frac{a}{\left(\frac{n\pi}{l}\right)^4 K_1^2} - \frac{u_0}{\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 K_1} \dots\dots\dots (7)$$

であるから、 u の解は

$$u = u_0 - at - \frac{a}{2K_1} \left[\left(x - \frac{l}{2} \right)^2 - \frac{l^2}{4} \right] - \frac{4al^2}{K_1 \pi^3} \sum \frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)^3} e^{-K_1 \frac{(2n-1)^2 \pi^2}{l^2} t} \times \cos \frac{(2n-1)\pi}{l} \left(x - \frac{l}{2} \right) \dots \dots \dots (8)$$

となり、近似的には

$$u = u_0 - at - \frac{a}{2K_1} \left[\left(x - \frac{l}{2} \right)^2 - \frac{l^2}{4} + \frac{8l^2}{\pi^3} e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \times \cos \frac{\pi}{l} \left(x - \frac{l}{2} \right) \right] \dots \dots \dots (9)$$

また、ある時刻における平均含水率 U_m は

$$U_m = \frac{2}{l} \int_0^l u \cdot dx = u_0 - at - \frac{a}{K_1} \left(-\frac{l^2}{12} + \frac{8l^2}{\pi^4} e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \right) \dots \dots \dots (10)$$

となる。しかし、この式では K_1 の値を一定とみなせば t の指定函数であるため、乾燥速度 $\left(\frac{d u_m}{d t} \right)$ は一定値とならず、恒率乾燥を示す式としては不合理となる。しいてこの指数曲線の部分を直線になるようにすることもできるが、あまり意味のあることとも思われないので、このような条件下でとかれた式は、恒率乾燥を表わすものとみなすことには無理があると考え、別途の式（本文（4.4）式参照）を用いるべきと思われる。

1.2 初期条件の水分分布が \sin 曲線型の場合

$$\frac{\partial u}{\partial t} = K_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

境界条件 $\left. \begin{array}{l} x=0 \quad u = u_0 - at = u_s \\ x=l \quad u = u_0 - at = u_s \end{array} \right\} \dots \dots \dots (11)$

初期条件 $u = u_0 + (u_c - u_0) \sin \frac{n\pi}{l} x \dots \dots \dots (12)$

ただし u_c = 中心部の含水率

この場合は (3) 式において

$$\left. \begin{array}{l} \int_0^l f(\lambda) \sin \frac{n\pi}{l} \lambda d\lambda = \frac{u_0 l}{n\pi} [1 - (-1)^n] + (u_c - u_0) \frac{l}{2} \\ \int_0^l e^{K \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \lambda} [\varphi_1(\lambda) - (-1)^n \varphi_2(\lambda)] d\lambda = e^{K_1 \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 t} \times \\ \left\{ -\frac{a}{\left(\frac{n\pi}{l} \right)^4 K_1^2} \left[K_1 \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 t - 1 \right] + \frac{u_0}{\left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 K_1} \right\} - \frac{a}{\left(\frac{n\pi}{l} \right)^4 K_1^2} - \frac{u_0}{\left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 K_1} \end{array} \right\} \dots \dots \dots (13)$$

であるから、整理して u の解を求めると

$$u = (u_0 - at) + \frac{a}{2K_1} x(l-x) - \frac{4al^2}{K_1\pi^3} \sum_1^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^3} e^{-K_1(2n-1)^2 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t} \times$$

$$\sin \frac{(2n-1)\pi}{l} x + 2(u_r - u_0) \sum_1^{\infty} e^{-K_1(2n-1)^2 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t} \times \sin \frac{(2n-1)\pi}{l} x \dots \dots \dots (14)$$

となり、近似的には

$$u = (u_0 - at) - \frac{a}{2K_1} \left[\left(x - \frac{l}{2} \right)^2 - \frac{l^2}{4} \right] + 2 \left[(u_r - u_0) - \frac{2a}{K_1} \cdot \frac{l^2}{\pi^3} \right]$$

$$\times e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t} \cdot \sin \frac{\pi}{l} x \dots \dots \dots (15)$$

とみなすことができる。また、平均含水率は

$$u_m = \frac{2}{l} \int_0^{\frac{l}{2}} u dx = (u_0 - at) + \frac{a}{K_1} \cdot \frac{l^2}{12} + \frac{4}{\pi} \left[(u_r - u_0) - \frac{2al^2}{K_1\pi^3} \right] e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t} \dots \dots \dots (16)$$

この場合も前項と同様にこの式が恒率乾燥をあらわす式ということには無理がある。

2. 第1減率乾燥

2.1 初期条件の水分分布が(9)式の場合

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} = K_2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \\ \text{境界条件 } x=0 \quad u = be^{-ct} + u_r = u_s = \phi(t) \\ \quad \quad \quad x=l \quad u = be^{-ct} + u_r = u_s = \phi(t) \\ \text{初期条件 } t=0 \quad u = F(x) \end{array} \right\} \dots \dots \dots (17)$$

$$F(x) = u_0 - at_0 - \frac{a}{2K_1} \left[\left(x - \frac{l}{2} \right)^2 - \frac{l^2}{4} + \frac{8l^3}{\pi^3} e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t_0} \times \cos \frac{\pi}{l} \left(x - \frac{l}{2} \right) \right] \dots \dots \dots (18)$$

ただし t_0 = 恒率乾燥を示した期間の時間数

この場合(3)式において

$$\left. \begin{array}{l} \int_0^l F(\lambda) \sin \frac{n\pi}{l} \lambda \cdot d\lambda = \frac{2l}{(2n-1)\pi} (u_0 - at) + \frac{a}{2K_1} \cdot \frac{4l^3}{(2n-1)^3 \pi^3} \\ \quad \quad \quad - \frac{a}{2K_1} \cdot \frac{4l^3}{\pi^3} e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t_0} \\ \int_0^l \phi(\lambda) e^{K_2 \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \lambda} d\lambda = e^{K_2 \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 t} \left\{ \frac{be^{-ct}}{K_2 \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 - c} + \frac{u_r}{K_2 \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \right\} \\ \quad \quad \quad - \frac{b}{K_2 \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 - c} - \frac{u_r}{K_2 \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \end{array} \right\} \dots \dots \dots (19)$$

である。この場合の u の解はすでに報告したので、ここにはその詳細をはぶくが、水分分布を示す実験式的なものとして次式がえられた。

$$u = u_e + be^{-ct} + \left[\frac{4}{\pi}(u_0 - at_0 - u_e) + \frac{a}{2K_1} \cdot \frac{8l^3}{\pi^3} \left(1 - e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t_0} \right) \right] \times e^{-K_2 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \cdot \sin \frac{\pi}{l} x \dots\dots\dots(20)$$

また、平均含水率は

$$u_m = \frac{2}{l} \int_0^{\frac{l}{2}} u dx = u_e + be^{-ct} + \frac{8}{\pi^2} \left[(u_0 - at_0 - u_e) + \frac{a}{2K_1} \cdot \frac{2l^3}{\pi^3} \left(1 - e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t_0} \right) \right] \times e^{-K_2 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \dots\dots\dots(21)$$

2.2 初期条件の水分分布を \sin 曲線とする場合

境界条件は (17) 式と同じであり、

初期条件 $t=0 \quad u = F(x) = u_F + (u_c - u_F) \sin \frac{\pi}{l} x \dots\dots\dots(22)$

ただし u_c = 中心部の含水率

u_F = 材表面の含水率で、繊維飽和点を示す。

(3) 式へこの $F(x)$ を入れて計算すると、 u の解は次のようになる。

$$u = \frac{2}{l} \sum e^{-K_2 \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 t} \cdot \sin \frac{n\pi}{l} x \left\{ \varepsilon_n \frac{u_F}{\frac{n\pi}{l}} + (u_c - u_F) \frac{l}{2} + \varepsilon_n \left(\frac{n\pi}{l} \right) K_2 \times \left[e^{K_2 \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 t} \left(\frac{be^{-ct}}{K_2 \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 - c} + \frac{u_e}{K_2 \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2} \right) - \frac{b}{K_2 \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 - c} - \frac{u_e}{K_2 \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2} \right] \right\} \dots\dots(23)$$

これを整理すると

$$u = \frac{4}{\pi} \sum_1^{\infty} \left(u_F - u_e - \frac{b}{1 - \frac{\omega^2}{(2n-1)^2}} \right) e^{-K_2 \left(\frac{(2n-1)\pi}{l} \right)^2 t} \cdot \frac{1}{(2n-1)} \sin \frac{(2n-1)\pi}{l} x + (u_c - u_F) \sum_1^{\infty} e^{-K_2 \left(\frac{(2n-1)\pi}{l} \right)^2 t} \cdot \sin \frac{(2n-1)\pi}{l} x + \frac{4}{\pi} be^{-ct} \sum_1^{\infty} \frac{2n-1}{(2n-1)^2 - \omega^2} \sin \frac{(2n-1)\pi}{l} x + u_e \doteq u_e + b \frac{e^{-ct}}{\sin \omega \pi} \left\{ \sin \omega \left(\pi - \frac{\pi}{l} x \right) + \sin \frac{\omega \pi}{l} x \right\} + \left\{ \frac{4}{\pi} (u_F - u_e) + (u_c - u_F) \right\} e^{-K_2 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \cdot \sin \frac{\pi}{l} x \dots\dots\dots(24)$$

ただし $\omega^2 = \frac{cl^2}{K_2 \pi^2}$

この場合も、前項と同様に K_2 を計算することができ、かつ水分分布を近似的に表わすことができればよいという考え方で、次の簡単な式をもつて水分分布を示す式とした。

$$u = u_e + be^{-ct} + \left\{ \frac{4}{\pi} (u_F - u_e) + (u_r - u_F) \right\} e^{-K_2 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \cdot \sin \frac{\pi}{l} x \dots \dots \dots (25)$$

したがって、平均含水率を示す式は次のごとくなる。

$$u_m = \frac{2}{l} \int_0^{\frac{l}{2}} u \, dx$$

$$= u_e + \frac{8}{\pi^2} \left\{ (u_F - u_e) + \frac{\pi}{4} (u_r - u_F) \right\} e^{-K_2 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \dots \dots \dots (26)$$

2.3 初期条件における水分分布が一様な場合

初期条件

$$t=0 \quad u = F(x) = u_b \dots \dots \dots (27)$$

(3) 式にこの $F(x)$ を用いて、 u の解を求めると次のようになり、

$$u = -\frac{2}{l} \sum_1^{\infty} e^{-K_2 \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 t} \cdot \sin \frac{n\pi}{l} x \left\{ \varepsilon_n \frac{u_b}{\frac{n\pi}{l}} + \varepsilon_n K_2 \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \times \left[e^{K_2 \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 t} \left(\frac{be^{-ct}}{K_2 \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 - c} \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{u_e}{K_2 \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2} \right) - \frac{b}{K_2 \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 - c} - \frac{u_e}{K_2 \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2} \right] \right\} \dots \dots \dots (28)$$

ただし $\varepsilon_n = 2n$

さらに、整理すると

$$u = u_e + \frac{be^{-ct}}{\sin \omega \pi} \left[\sin \frac{\omega \pi}{l} (l-x) + \sin \frac{\omega \pi}{l} x \right]$$

$$+ \frac{4}{\pi} \sum_1^{\infty} e^{-K_2 \left(\frac{(2n-1)\pi}{l} \right)^2 t} \cdot \sin \frac{(2n-1)\pi}{l} x \left[\frac{u_b - u_e}{2n-1} - \frac{b(2n-1)}{(2n-1)^2 \omega^2} \right] \dots \dots \dots (29)$$

となるが、水分分布を近似的に示す実験式的なものは次のごとくなる。

$$u = u_e + be^{-ct} + \frac{4}{\pi} (u_b - u_e) \sum_1^{\infty} \frac{1}{2n-1} e^{-K_2 \left(\frac{(2n-1)\pi}{l} \right)^2 t} \times \sin \frac{(2n-1)\pi}{l} x \dots \dots \dots (30)$$

したがって、平均含水率は次のようになる。

$$u_m = \frac{2}{l} \int_0^{\frac{l}{2}} u \, dx$$

$$= \underbrace{u_e + be^{-ct}}_{u_s} + \frac{8}{\pi^2} (u_b - u_e) \sum_1^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} e^{-K_2 \left(\frac{(2n-1)\pi}{l} \right)^2 t} \dots \dots \dots (31)$$

3. 第 2 減率乾燥

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} = K_3 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \\ \text{境界条件 } x=0 \quad u = u_e \\ \quad \quad \quad x=l \quad u = u_e \end{array} \right\} \dots\dots\dots (32)$$

3.1 初期条件の水分分布が (9) 式で表わされる場合

初期条件

$$t=0, \quad u = F(x) = u_0 - at_0 - \frac{a}{2K_1} \left[\left(x - \frac{l}{2} \right)^2 - \frac{l^2}{4} + \frac{8l^2}{\pi^3} e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t_0} \cdot \cos \frac{\pi}{l} \left(x - \frac{l}{2} \right) \right] \dots\dots\dots (33)$$

この解は

$$u = u_e + \frac{2}{l} \sum_1^{\infty} e^{-K_3 \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 t} \cdot \sin \frac{n\pi}{l} x \int_0^l f(\lambda) \sin \frac{n\pi}{l} \lambda \cdot d\lambda \dots\dots\dots (34)$$

となるので、近似的に水分分布を示す式として次式がえられる。

$$u = u_e + \left[\frac{4}{\pi} (u_0 - at_0) + \frac{a}{2K_1} \cdot \frac{8l^2}{\pi^3} \left(1 - e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t_0} \right) \right] \times e^{-K_3 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \cdot \sin \frac{\pi}{l} x \dots\dots\dots (35)$$

また、平均含水率は次のごとくである。

$$u_m = u_e + \frac{8}{\pi^2} \left[(u_0 - at_0) + \frac{a}{2K_1} \cdot \frac{2l^2}{\pi^2} \left(1 - e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t_0} \right) \right] \times e^{-K_3 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \dots\dots\dots (36)$$

3.2 初期条件の水分分布が sin 曲線で表わされる場合

$$\text{初期条件 } t=0, \quad u = F(x) = u_e + (u_c - u_e) \sin \frac{\pi}{l} x \dots\dots\dots (37)$$

(34) 式にこの $F(x)$ を代入して、 u の近似値を求めると

$$u = u_e + (u_c - u_e) \sin \frac{\pi}{l} x \cdot e^{-K_3 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \dots\dots\dots (38)$$

となり、平均含水率は次のごとくなる。

$$u_m = u_e + \frac{2}{\pi} (u_c - u_e) e^{-K_3 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \dots\dots\dots (39)$$

3.3 水分分布が一様の場合

初期条件

$$t=0, \quad u = F(x) = u_0 \dots\dots\dots (40)$$

この場合の u, u_m はそれぞれ次のごとくなる。

$$\left. \begin{aligned}
 u &= u_e + \frac{4(u_b - u_e)}{\pi} \sum_1^{\infty} \frac{1}{2n-1} e^{-K_3 \left(\frac{(2n-1)\pi}{l} \right)^2 t} \cdot \sin \frac{(2n-1)\pi}{l} \cdot x \\
 &\doteq u_e + \frac{4(u_b - u_e)}{\pi} e^{-K_3 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \cdot \sin \frac{\pi}{l} x
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (41)$$

$$\left. \begin{aligned}
 u_m &= \frac{2}{l} \int_0^{\frac{l}{2}} u \cdot dx \\
 &= u_e + \frac{8}{\pi^2} (u_b - u_e) \sum_1^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} e^{-K_3 \left(\frac{(2n-1)\pi}{l} \right)^2 t} \\
 &\doteq u_e + \frac{8(u_b - u_e)}{\pi^2} e^{-K_3 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (42)$$

以上恒率，減率乾燥の各段階において，初期水分分布がいろいろな場合についての解を求めてきたが，その条件に適合する解を用いれば，どの場合でも，水分伝導度 K の値を知ることによつて，ある時刻における水分分布および平均含水率を計算することができ，また平均含水率と時刻との関係を知つて，水分伝導度 K の値を求めることもできる。

文 献

- 1) KAMEI, S.: Untersuchung über die Trocknung fester Stoffe. *Memoris of the College of Engineering Kyoto University*. Vol. III, No. 1, (1934)
- 2) KAMEI, S.: 同上 Vol. IX, No. 2, (1935)
- 3) KAMEI, S.: 同上 Vol. X, No. 3, (1937)
- 4) KOLLMANN, F.: *Technologie des Holzes und Holzwerkstoffe*. Bd. 1, (1951)
- 5) KRÖLL, K.: Die Bewegung der Feuchtigkeit in Nadelholz während der Trocknung bei Temperaturen um 100°C. *Holz als Roh- und Werkstoff*. Heft 5, 6, (1951)
- 6) 満久崇磨: 木材乾燥の研究 木材研究 (京大木材研究所) 6, (1951)
- 7) MAKU, T: Studies on the drying of wood. *Wood Research*. No. 13, *Bull. of the Wood Research Inst. Kyoto University*. (1954)
- 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*, 33, 12, (1951)
- 9) 小倉武夫: 木材の乾燥機構に関する研究, 第1報 表面蒸発速度及水分伝導度と板の厚さとの関係, *林業試験場研究報告*, 42, (1949)
- 10) 小倉武夫: 同上, 第3報 木材水分の蒸発速度について, *林業試験場研究報告*, 51, (1951)
- 11) 小倉武夫: 同上, 第4報 水分伝導度の外周条件による影響, *林業試験場研究報告*, 51, (1951)
- 12) 小倉武夫: 同上, 第6報 水分拡散方程式の解, *林業試験場研究報告*, 54, (1952)
- 13) 小倉武夫: 木材の水分移動性および乾燥中に生ずる歪みの温度による影響, *林業試験場研究報告*, 77, (1955)
- 14) 小倉武夫・梅原誠: 木材の水分拡散係数の温度, 木取り, 厚さによる影響, *木材学会誌*, 3, 2, (1957)
- 15) 大草克己・林昭三: 木材の熱気乾燥に関する研究 (第2報), 第63回林学会大会講演集 4月, (1954)
- 16) SCHLÜTER, R. und FESSEL, F.: Neue praktische Erfahrungen bei der künstlichen Holz-trocknung, *Trockentechnik*. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Heft 5, (1939)

17) SHERWOOD, T. K. und COMINGS, E. W. Trans. Am. Inst. Chem. Eng. 27, (1932)
 18) STAMM, A. J.: Passage of liquids, vapors and dissolved materials through softwoods.
 U. S. Dept. Agr. Tech. Bull. No. 929, (1946)

Studies on the Mechanism of Drying of Wood (7)
On computing the time required to dry wood by using the
moisture conductivity

Takeo OGURA

(Résumé)

This series of studies on the mechanism of drying of wood has been conducted for the purpose of obtaining the effects of drying conditions on the moisture movement through wood, and of searching for the possibility of calculating the limit of time for kiln drying of wood only from the standpoint of moisture diffusivity in wood without any of the defects likely to occur in excessively fast drying of wood. Assuming that the moisture movement through wood is expressed by the equation $\frac{\partial u}{\partial t} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ which is the same as the one for heat conductivity, the solution of each stage of constant, the first decreasing and the second decreasing rate of drying were obtained by applying the decreasing course of the moisture on surface to the boundary conditions to solve the equation, as shown in the appendix.

In this report are described the effects of drying conditions on moisture conductivity K and diffusion coefficient λ , the possibility of calculating satisfactorily in practical use the time required to dry wood, applying suitable values of K for the drying conditions to the solutions of diffusion equation.

The results obtained roughly are as follows:

1) It was found that the values of K obtained at the stage of the second decreasing rate of drying are fairly uniform as regards each of the species and the drying conditions, and that the following relationships exist between the materials dried and the drying conditions.

(a) The K -values become larger as the thickness (l) of the boards increases, as shown in the following formula:

$$K_2 = K_1 \sqrt{\frac{l_2}{l_1}} \dots \dots \dots (1)$$

The two K -values, accordingly, should be compared with each other after the K -value obtained at a certain thickness of board is converted into that of a constant thickness, for example, 1 cm thick, using Fig. 1.

(b) The K -values proportionally increase with temperature within the range of 40~80°C, as shown in Fig. 2, which is the range usually used in the practice of kiln drying of wood.

(c) The effect of wet bulb depression on moisture conductivity depends upon the thickness of board. In the case of such a thin material as veneer, the K -values increase with the wet bulb depression, that is vapor pressure difference, as shown in Fig. 3, but in

the case of boards more than 2 cm thick, the K -values gradually increase with wet bulb depression below 15° or 20°C, and tend to decrease beyond the depression abovementioned, as shown in Fig. 5.

It seems that case-hardening is apt to occur on the face of the board as it dries, and with the increasing of the thickness.

(d) The moisture conductivity K_s can be obtained from the drying rate at a certain moisture content in the stage of the second decreasing rate of drying, and the following equation is given.

$$\frac{dU_m}{dt} = -K^3 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 U_m \dots\dots\dots(2)$$

where U_m = free moisture content.

l = thickness of board.

By this means the moisture conductivities of various species are obtained, and these are shown in Tab. 4. Fig. 7 shows the tendency of decreasing K -values with the specific gravities, although the experiments were not conducted on many kinds of species. The value of moisture conductivity seems to be related not only to specific gravity, but to the thickness of cell walls, and to the other characters of each species affecting moisture movement.

2) The effect of species and drying conditions on diffusion coefficient λ is not the same as that on moisture conductivity K . The relationship between them, that is $K = 100 \frac{\lambda}{r_0}$, is given on the occasion of deriving the diffusion equation, but it is found that this relation does not necessarily exist between every value of K and λ , which were obtained respectively by the different experiments. These are shown in Tab. 6 and 7.

3) It is reported that the mean moisture content at a certain time in the process of wood drying could be calculated by using the solution of the diffusion equation $\frac{\partial u}{\partial t} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$, which can be obtained by applying the decreasing course of surface moisture content to the boundary condition of the equation. But the solution obtained in this way with respect to the constant rate of drying cannot express the linear decreasing course (See app. p. 155) which is actually found in the case of a constant rate of drying; therefore, the following formula obtained conditionally that a drying rate is constant is used to express this stage of drying.

$$u_a - u_b = \frac{100}{r_0} \cdot \frac{2}{l} \cdot k_\theta \cdot \Delta\theta \cdot t \dots\dots\dots(3)$$

where u_a, u_b = moisture content.

r_0 = sp. gravity.

k_θ = evaporation coef. at time of $\theta^\circ\text{C}$.

$\Delta\theta$ = wet bulb depression.

t = time in constant rate of drying.

The length of time in a constant rate of drying is determined on the basis of the view explained in the following: The constant rate of drying of wood continues until the moisture content on the surface reaches the fibre saturation point. The decreasing course of only the surface-moisture content of wood should be also expressed by the following, which is the same type as equation (3).

$$u_{sa} - u_{sb} = \frac{100}{r_0} \cdot \frac{2}{\beta l} \cdot k_\theta \cdot \Delta\theta \cdot t \dots\dots\dots(4)$$

In this case, however, the factor “ β ” equivalent to thickness of board is taken into consideration in the above equation, because of the existence of moisture gradient in wood being dried. The viewpoint from which factor “ β ” is regarded is described in the following: This value of β is the thickness of board equivalent to the amount of moisture evaporated from wood in the period of a constant rate of wood drying. It can be assumed that $\beta=0$ when all of the moisture that moves to the surface of the board without any resistance against moisture movement through wood is completely evaporated depending upon the drying condition, that is to say, the evaporation of moisture in wood is not entirely controlled, and that $\beta=1$ when the evaporation of moisture on the surface is completely regulated by the moisture movement through wood, consequent upon the existence of high resistance against the movement of moisture. The β -value could be calculated by the following formula, if u_b in this equation be measured.

$$\beta = \frac{u_a - u_b}{u_{sa} - u_{sb}} \dots\dots\dots(5)$$

where $u_a = u_{sa}$ = initial moisture content.

u_{sb} = fibre saturation point.

u_b = mean moisture content when surface moisture reaches to F. S. P.

Fig. 10 shows the apparatus for measuring u_b , in which two test pieces of $10 \times 10 \times 2$ or 4 cm in size are placed, using one to measure the weight at every hour and the other to get the surface temperature, the distance between two marks on the surface. The results measured are shown in Fig. 11, and u_b , the mean moisture content of test piece at the time when the surface moisture content reaches fibre saturation point, can be roughly presumed corresponding to the point at which the surface temperature and the distance between two marks changes to decrease as shown in Fig. 11. The β -values obtained in this way for the abovementioned are 0.4 for beech regardless of thickness as shown in Tab. 8. As regards the β -value, however, the study should be continued further because of the present fewness of experiments. It can be said that this β -value expresses the relative diffusivity of moisture, particularly free water in wood. However, it should be noted that the diffusivity of moisture in wood can be investigated not by taking into account the specific gravity or thickness of board alone, but by the putting together of these factors of r_0 , l and β , that is βl , βr_0 and $\beta l r_0$ in the equation abovementioned, depending upon the characteristics of each species.

4) The decreasing course of surface moisture content in the stage of a second decreasing rate of drying is also expressed by the same type as eq. (4). In this stage of drying, however, the β -value is regarded as $\beta=1.0$, because all of the moisture that has moved to the surface of wood has evaporated, so the decreasing course of surface moisture content can be expressed by the following equation,

$$U_S = U_F - \frac{100}{r_0} \cdot \frac{2}{l} k_p (p_w - p_0 - p_r) \cdot t \dots\dots\dots(6)$$

by which the length of time “ t ” to dry the moisture of fibre saturation point on the face of board to the equilibrium moisture content corresponding to the drying condition of air can be calculated.

On the other hand, the course of drying wood is generally expressed by the following equation,

$$U_S = U_F e^{-ct} \dots\dots\dots(7)$$

and the c -value in this equation can be calculated for the various conditions of drying by applying the relationship between U_s and t obtained from eq. (6) to eq. (7). Fig. 14 shows the c -values for various kinds of drying conditions, and by using this diagram the presumption of the decreasing course of the surface moisture content of board can be made easily.

5) The length of time in the constant rate, the first decreasing rate and the second decreasing rate of drying of wood can be calculated respectively as explained in the following:

(a) The time to dry wood at a constant rate can be obtained by eq. (4) as described above, the mean moisture content of wood at the end of the constant rate of drying can be found by applying the time obtained in the above to eq. (3). The chart given in Fig. 12 obviates calculation.

(b) The time in the decreasing rate of drying, in which the surface moisture content reaches the equilibrium moisture content corresponding to the drying condition of air, can be obtained by eq. (5.11) shown on p. 142. Fig. 15 is the calculating chart in which the standard used is temperature 60°C , specific gravity 0.5 and thickness of board 2.0 cm. The chart can be used for the conditions other than the standard by converting into them. Moreover, the moisture content at the end of this stage of drying can be calculated by eq. (5.4) shown on p. 141, of which t is applied by the value obtained in the above, and can easily be obtained by Fig. 16.

(c) The time in the second decreasing rate of drying is given by eq. (6.5) shown on p. 145, and can easily be obtained by Fig. 17, when the initial moisture content in this stage, the equilibrium moisture content for a drying condition, the moisture content to be dried, the moisture diffusivity K_s of the species and the thickness of board are given.

6) In order to check the accuracy of the time to dry wood obtained by using these charts, comparisons of the time calculated with that taken in practice were conducted. Various samples were picked out from data in the reports already published, and the length of time to dry wood was calculated for each of the samples using the same drying condition as used in actual practice. The results obtained are shown in Tab. 9. This reveals the fact that the calculated time generally agrees with the practiced in the case of the proper value of moisture conductivity being used, particularly in the second decreasing rate of drying.

7) The drying rates in a constant rate of drying of wood and in a second rate are shown in eq. (8) and (9) respectively,

$$\left| \frac{du}{dt} \right| = \frac{100}{r_0} \cdot \frac{2}{l} \cdot k_g \cdot \Delta\theta \dots\dots\dots (8)$$

$$\left| \frac{dU_m}{dt} \right| = K_s \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 U_m \dots\dots\dots (9)$$

and these can be obtained easily by means of the calculating charts shown in Fig. 18 and 19. The former can be obtained by the factors of temperature, wet bulb depression, specific gravity and thickness of board, and the latter by the free moisture content, moisture conductivity and thickness of boards. Fig. 20 shows some of the drying data obtained for the various kinds of drying conditions by using these calculating charts.