製材の乾燥時間算定法に関する研究 (第 1 報)

高温乾燥における現象区分とモデル化^{*1}相馬智明^{*2}, 鈴木裕一^{*3}, 稲山正弘^{*2}, 安藤直人^{*2}

Study of Calculation Method for Timber Drying Time I.

Heat and mass transfer model of timber drying process
with high temperature^{*1}Tomoaki SOMA^{*2}, Yuichi SUZUKI^{*3},
Masahiro INAYAMA^{*2} and Naoto ANDO^{*2}

Drying schedules for timber have been decided depending on research effort and experience of the dryer's operators. When they encounter drying conditions that are new and/or outside of prior experience, they should find the optimal method to dry timber sufficiently. We think that we can help them to find the optimal schedule by setting up a drying time calculation method based on heat and mass transfer theories. In this study, we focused on high drying temperature above the boiling point, we divided the high temperature drying process into 4 phases, and applied different models for each phase. Approximate data of thermo physical properties for those calculations was obtained from valuable references of the past.

Keywords: drying time, calculation method, heat mass transfer, finite difference method, crank nicolson.

製材の人工乾燥スケジュールは実験的な研究成果や乾燥実務者の経験によって決定されており、そのためこれまで経験のない乾燥条件に遭遇した時には、実務現場で試行的に最適条件を見出しているのが現状である。筆者らは、伝熱工学的アプローチから製材の乾燥時間を算定する方法を構築し、机上計算によりある程度の乾燥スケジュールの目的を付けることを可能とすることで、こうした現場における試行を効率化できると考えた。そこで本報では水の沸点を超える比較的高温の乾燥過程に着目し、乾燥過程を4つの段階に分け、それぞれにおいて異なる伝熱モデルを適用して各段階における乾燥時間の算定法を示した。また、算定に使用する熱物性値を既往の研究データから近似的に求め、まとめた。

1. はじめに

柱や梁などの軸組材として用いられる製材は一般に人工乾燥される。製材の人工乾燥は、天然乾燥と比べ、より短時間に製材の含水率を目標値まで到達させることを目的として行われる。対象となる製材の樹種や断面寸法、乾燥する季節が変わった場合など、乾燥条件が異なる場合の乾燥温度および相対湿度のスケジュール設定は、これまでの実験的な研究成果や乾燥機を運転する者の経験に基づいて決定されている。しかし新たな乾燥条件に遭遇したときには、その時々で試行され模索されているのが現状で

^{*1} Received September 24, 2012; accepted February 1, 2013.

^{*2} 東京大学大学院農学生命科学研究科 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, Tokyo 113-8657, Japan

^{*3} 元東京大学大学院農学生命科学研究科 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, Tokyo 113-8657, Japan

Corresponding author: T. Soma (asoma@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp)

ある。最近では、木造建築物における燃えしろ設計などのために比較的大きな断面の製材が要求される場合があるが、これまで中断面や大断面の製材の人工乾燥はほとんど行われていないため、経験的な知見が少なく、新たなスケジュールの作成が必要となっているところである。

筆者らは、こうした新たなスケジュール作成を伝熱工学的知見に基づく机上計算によりある程度目途がつけられれば、現場における試行の手助けとなり、より合理的かつ効率的になると考えた。乾燥に要する時間を算定すれば、個体間のばらつきはあるものの、平均的な乾燥スケジュールを知ることができ製品加工において便利である。またさらに精確さが向上すれば乾燥時間を最適化でき、省コスト化、省エネルギー化および安定した品質の確保（ここでは含水率）が期待できる。そこで本研究では、木材乾燥機の外部温度、乾燥庫内の温度（乾燥温度）、乾燥する木材の樹種、密度、断面寸法、初期含水率等をパラメータとして製材乾燥に要する時間を推定する算定法を導くことを目的とした。

本報では、製材の乾燥時間算定法の考え方とプロセスを述べる。具体的には製材乾燥過程を4つの段階に区分し、各段階における伝熱モデルを示す。それらの伝熱モデルによる計算値の実験的検証は第2報に示すこととする。

2. 沸点を超える乾燥温度における乾燥段階

製材の乾燥加工は、一般に回分処理（バッチ処理）であり、乾燥過程において乾燥機の昇温、保温が行われ、庫内の製材が目標含水率まで乾燥した、あるいは乾燥する直前であると判断された時点で放熱、冷却が行われる。例えば、水の沸点を超える120℃で50 mm 角のヒノキ材を乾燥させたときの表層温度と中心温度の推移はFig. 1のとおりである。図中に示された、一連の乾燥過程における乾燥段階ⅠからⅢは、製材内で起きている熱移動と水分移動の現象が異なるため、各段階で個別に伝熱モデルを適用する必要がある。製材の長さ方向で最も乾燥しにくい部分は中央部分であることから、本報では中央部分の横断面を計算対象として取り扱う。

2.1 段階Ⅰ：昇温段階

Fig. 1 中に示した段階Ⅰは、製材の昇温段階であり、製材の表層と中心温度が急激に上昇する。製材の中心温度の上昇は表層温度のそれに対して、時間的な遅れが生じていることが分かる。段階Ⅰにおける伝熱モデルを適用するにあたり、次のことを仮定する。

Fig. 1. Change of temperature during wood drying.
Notes: I: heating process, II: coexistence process with gas and liquid phases, III: bound water transfer process.

1. 計算の簡略化のため、製材の形状を無限円筒とする。
2. 乾燥開始から製材内部温度が100℃に達するまでとする。
3. 乾燥前の製材の温度は一樣である。
4. 乾燥温度（周囲の流体温度、乾燥機の庫内温度）は一定である。
5. 製材への熱の流入は、周囲にある流体による対流伝熱のみとする。

以上の条件から、Fig. 2 に示したような、初期温度が一樣である半径 R の無限円筒が対流による伝熱を受ける場合の、製材内部の温度分布の厳密解は次のように示される¹⁾。

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\zeta_n^2 Fo) J_0(\zeta_n r^*) \quad (1)$$

Fig. 2. Infinite cylinder heated by convection.

Notes: R : radius of infinite cylinder, r : distance to objective concentric circle, r^* : ratio of r to R , $\uparrow$: convection.

$$\left. \begin{aligned} \theta^* &= \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad C_n = \frac{2}{\zeta_n} \frac{J_1(\zeta_n)}{J_0^2(\zeta_n) + J_1^2(\zeta_n)} \\ \zeta_n \frac{J_1(\zeta_n)}{J_0(\zeta_n)} &= Bi \quad Fo = \frac{\alpha t}{R^2} \\ J_0(x) &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (x/2)^{2k}}{k! \Gamma(k+1)} \\ J_1(x) &= \left(\frac{x}{2}\right) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (x/2)^{2k}}{k! \Gamma(k+2)} \\ r^* &= \frac{r}{R} \quad Bi = \frac{hR}{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 T : 製材温度 (°C), T_∞ : 庫内温度 (°C), T_i : 初期製材温度 (°C), α : 温度伝導率 (m^2/h), t : 時間 (h), R : 円筒半径 (m), r : 円筒中心からの距離 (m), h : 庫内流体の熱伝達率 ($\text{kJ}/\text{hm}^2\text{K}$), λ : 製材の熱伝導率 (kJ/hmK) であり, Fo は Fourier 数, Bi は Biot 数である。

式(1)は、第1種 Bessel 関数を含む無限級数の和となるが、 Fo が極めて小さい場合 ($Fo < 0.2$) を除き、第1項のみを考えれば十分である。従って近似解として次のように表すことができる。

$$\theta^* = C_1 \exp(-\zeta_1^2 Fo) J_0(\zeta_1 r^*) \quad (3)$$

初期温度が20°Cで一様な材料を120°Cの空間に入れたときの材料内部温度の時間変化を求めるため、 $T_i = 20$, $T_\infty = 120$ を代入すると下式となる。

$$\exp(\zeta_1^2 Fo) = 5C_1 J_0(\zeta_1 r^*) \quad (4)$$

ハイスラー線図に見られるように、係数 C および ζ は Bi によって決定するため、 Fo は Bi の関数として近似できる。円筒の中心から半径 R の5%の位置で100°Cになるまでの時間 t は、円筒の半径 R を用いて式(5)、式(6)で表される。

$$Fo = \frac{\alpha t}{R^2} = 1.04 Bi^{-0.925} \quad (5)$$

$$t = \frac{R^2}{\alpha} (1.04 Bi^{-0.925}) \quad (6)$$

以上から段階Ⅰに要する時間は、熱伝達率 h と熱伝導率 λ の比を表す Bi に依存し、また半径 R の2乗に比例することがわかる。 Bi は乾燥機のファン風量や大きさ、乾燥対象の置き方などの条件で変化する熱伝達率 h で決定されることから、対象とする乾燥機や乾燥方式固有の値であると考えてよい。計算に使う場合には乾燥機、乾燥方式ごとに実測が必要である。また、式中 α は木材の温度伝導率で、熱伝導率 λ 、比熱 c 、密度 ρ から算出できる特性値である。

2.2 段階Ⅱ：液相・気相の共存段階

Fig.1 に示されているように、材料内部の温度が100°Cで一定である期間が存在する。これは材料内

部に自由水が存在していて、流入した熱量が蒸発潜熱に使われているためである。そこで段階Ⅱは、段階Ⅰが終了してから、製材内部の自由水が全て水蒸気になるまでとし、次のことを仮定する。

1. 計算の簡略化のため、製材の形状を無限円筒とする。
2. 製材内部温度が100°Cに達してから、100°Cを超える温度に上昇し始めるまでとする。このとき製材内部は、木材実質と100°Cの自由水からなる液相と、木材実質と水蒸気からなる気相の2種類が共存する状態である。
3. 液相の温度は一律に100°Cである。
4. 段階Ⅱにおいて加熱により与えられた熱量は、すべて境界移動に使われる。

これらの条件を満たす製材内部において、相変化を伴う円筒自由境界モデルを考える。モデルの概念図を Fig.3 に示す。相変化をともなう自由境界モデルは、円筒に満たされた水が冷やされ最外縁から凍ってゆく現象などを表すのに用いられる。ここでは製材内部の自由水が蒸発していく現象に当てはめて考えることとする。

Fig.3 中の(A)～(D)は無限円筒における半径方向断面の、中心から外縁までの各状態である。色のついた部分は液相を、そうでない部分は気相を表している。各状態は以下のとおりである。

- (A) 完全な飽水状態であり、中心から外縁まですべて液相である状態。
- (B) 気相と液相が共存する状態で、自由水が軸中心に偏って散在している、乾燥前の生材など現実的な製材の初期状態。

Fig.3. Free boundary model involving a change of phase.

Notes: T_s : temperature of surface, T_f : temperature of liquid phase, R : radius of infinite cylinder, r : distance to objective point, E : distance to boundary.

(C) (B) の状態を, 気相と液相の 2 つに区分する理想境界を与えた境界モデル。

(D) 製材内部がすべて気相となり, 自由水の蒸発潜熱がなくなることから, 内部温度が 100℃ を超え始める状態。

一次元の自由境界モデルは Stephen 問題として厳密解を求めることができるが, 無限円筒の場合, 現在のところ厳密解は解かれておらず得ることができない。しかし, 準定常解であれば, 以下のように近似解を得ることができる²⁾。Stephen 数 $S_f (= c(T_f - T_s)/L)$ が小さいとするとこのモデルは, 両端の温度が与えられた二重円筒の定常熱伝導解に近くなり, 温度分布は以下のように近似的に与えられる。

$$T = T_s + (T_f - T_s) \frac{\ln(r/R)}{\ln(E/R)} \quad (7)$$

境界面での熱収支について, 与えられた熱量が全て境界移動にかかるエネルギーとして使われるという条件から式 (8) が成り立つ。

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{r=E} (2\pi E) = -\rho L (2\pi E) \frac{dE}{dt} \quad (8)$$

式 (7), (8) および S_f から整理すると, 式 (9) となる。

$$E \ln \left(\frac{E}{R} \right) \frac{dE}{dt} = \alpha S_f \quad (9)$$

ここに ρ : 気相の密度 (kg/m³), λ : 気相の熱伝導率 (W/mK), α : 気相の温度伝達率 (m²/h), L : 相変化熱 (kJ/kg), E : 表層から境界面までの距離 (m), T_f : 液相温度 (℃, 沸点で 100℃), T_s : 表面温度 (℃), R : 円筒半径 (m), S_f : Stephen 数である。 S_f は $c(T_s - T_f)/L$ で表され, 気相の比熱 c (kJ/kgK) と相変化熱 L (kJ/kg) によって決まる値である。

式 (9) を $t=0$, $E=R$ の条件で解くと, 時間 t と境界面移動距離 E の関係を表す式 (10) が得られる。

$$1 - \left(\frac{E}{R} \right)^2 \left\{ 1 - \ln \left(\frac{E}{R} \right) \right\} = \frac{4\alpha}{R^2} S_f \cdot t \quad (10)$$

式 (10) から境界面が中心 ($E=0$) まで移動する時間 t_{total} は式 (11) で表せる。

$$t_{\text{total}} = \frac{R^2}{4\alpha S_f} = \frac{\rho R^2 L}{4\lambda (T_s - T_f)} \quad (11)$$

式 (11) の t_{total} は, Fig. 3 中の (A) → (D) に要する, 完全液相状態から完全気相状態に乾燥するまでの時間である。しかし, 実際には段階 II 開始時の製材内部の状態は (B) のように液相がある偏りを持って気相中に散在していると想像される。(B) の状態は, 乾燥開始前の製材内部の含水率分布に由来するため, 含水率分布は個体間によってばらついているはずで推定不能である。そこで (B) を (C) のように中

心からある部分までは液相, その境界から表面までは気相であると区分する境界を理想的に与える。液相部分の長さ, すなわち, 軸中心から境界までの距離 E が初期含水率に比例し一意的に決定するもの (円筒断面の面積 πE^2 に比例する) と考えると, 製材内部の初期の境界位置 E_i を初期含水率という物理量に置き換えることができる。初期含水率が既知である (C) から (D) に要する時間 t を実験的に求めることにより, 計算によって求められた (A) から (D) に要する時間 t_{total} から t/t_{total} を求めることができる。 t/t_{total} は無次元化された時間であり, 断面寸法 (半径 R) が変わっても一定であるため, これを使えば断面寸法が異なる場合についても境界面が中心に移動するまでの時間 t を算定できる。なお, ここで扱っている気相とは, 結合水と水蒸気およびそれらを含む木材実質を合わせた物質のことを指すことに注意が必要であり, 気相の物性値 ρ , λ および α は水蒸気と木材実質の複合物質の物性値として用意しておく必要がある。

2.3 段階 III: 気相段階

液相が相変化して気相となると, 製材の中心部で温度が 100℃ を超え始める。この時点で, 製材中の水分は, 木材実質に結合している結合水と, 細胞内腔等に含まれる水蒸気が存在するものと考えられる。段階 I および段階 II では, それらの終了時点を製材の中心温度で決定したが, 気相段階では中心温度に頼って終了を判断することができない。したがって, 製材内部の含水率を計算対象とする必要がある。製材内部の含水率の時間変化を計算するには, 非定常状態を対象とした解析法が必要となる。ここでは熱水分同時移動モデルを用いて, 木材内の温度分布, 含水率分布の時間変化を推定する。熱・水分同時移動モデルは熱と水分の収支を, 伝熱の基礎式と水分移動の基礎式としてそれぞれ表わし, それらを連立して数値解を求めることで, 温度分布と同時に含水率分布が得るものである³⁻⁵⁾。この段階では以下のことを仮定する。

1. 製材内部の水分は, 結合水あるいは水蒸気として存在する。
2. 製材内部の圧力差はないものとして無視する。

実際には, 製材を加熱した時, 内部圧力が上昇することが知られているが⁶⁾, 気相で発生する圧力は比較的小さいことと, 計算を簡略化するために, 本報では内部圧力の影響を無視する。

2.3.1 支配方程式

製材内部のある微小領域における熱収支を表わす熱伝導方程式を式 (12) に示す。基本的にはフーリエ

の熱伝導に従うが、式中、右辺第2項に結合水の木材実質との結合が切れるときに使われる潜熱が表されているのが特徴である。またここでの境界条件は熱伝達率が指定された第3種境界条件とする。

繊維飽和点以下での、木材内部の水の拡散速度は含水率勾配、水蒸気圧勾配、化学ポテンシャル勾配等に比例すると考えられている^{4,7)}。これに従い結合水の拡散速度を化学ポテンシャル勾配から計算することを試みたが、化学ポテンシャル勾配による数的表現では、計算上煩雑になってしまうことがわかった。一方、Skaarらは化学ポテンシャル勾配を拡散の駆動力とし、結合水の活性化エネルギーの値を考慮して、結合水の移動を、含水率勾配、温度勾配を用いて表している⁸⁾。これを採用して結合水の移動を温度勾配、含水率勾配によって表現することとし、製材内部の水分移動の基礎式を式(13)とおいた。ここでの境界条件についても、熱収支と同様に水分伝達率が指定された第3種境界条件とする。

〈熱収支〉

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho_d Q_v \frac{1}{100} \frac{\partial M}{\partial t} \quad (12)$$

初期条件: $T(x, 0) = T_i(x_i, 0)$

境界条件: $-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h(T_\infty - T(0, t))$

ここに、 c : 水分を含む製材の比熱 (kJ/kgK), ρ : 水分を含む製材の密度 (kg/m³), λ : 水分を含む製材の熱伝導率 (kJ/mhK), ρ_d : 製材の全乾密度 (kg/m³), Q_v : 微分吸湿熱 (kJ/kg), T : 温度 (°C), t : 時間 (h), x : 位置 (m), M : 含水率 (%), T_i : 初期温度 (°C), T_∞ : 炉内温度 (°C), h : 熱伝達率 (kJ/m²hK) である。

〈水分収支〉

$$\rho_d \frac{1}{100} \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (13)$$

初期条件: $M(x, 0) = M_i(x_i, 0)$

境界条件: $-\alpha \frac{\partial M}{\partial x} \Big|_{x=0} - \beta \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = l(M_\infty - M(0, t))$

ここに、 α : 含水率勾配結合水移動係数 (kg/mh), β : 温度勾配結合水移動係数 (kg/mhK), M_i : 初期含水率 (%), l : 水分伝達率 (kg/m²h),

〈熱収支〉

$$T_{m,s}^{i+1} = \frac{Fo(T_{m-1,s}^i + T_{m+1,s}^i + T_{m,s-1}^i + T_{m,s+1}^i + T_{m-1,s}^{i+1} + T_{m+1,s}^{i+1} + T_{m,s-1}^{i+1} + T_{m,s+1}^{i+1} - 4T_{m,s}^i)}{2(1+2Fo)} + \frac{\rho_d Q_v (M_{m,s}^{i+1} - M_{m,s}^i) / 100 c \rho + T_{m,s}^i}{1+2Fo} \quad (14)$$

〈水分収支〉

$$M_{m,s}^{i+1} = \frac{\alpha (M'_{m-1,s} + M'_{m+1,s} + M'_{m,s-1} + M'_{m,s+1} + M_{m-1,s}^{i+1} + M_{m+1,s}^{i+1} + M_{m,s-1}^{i+1} + M_{m,s+1}^{i+1} - 4M_{m,s}^i)}{2(\rho_d \Delta x^2 / 100 \Delta t + 2\alpha)} + \frac{\beta (T_{m-1,s}^i + T_{m+1,s}^i + T_{m,s-1}^i + T_{m,s+1}^i + T_{m-1,s}^{i+1} + T_{m+1,s}^{i+1} + T_{m,s-1}^{i+1} + T_{m,s+1}^{i+1} - 4T_{m,s}^i)}{2(\rho_d \Delta x^2 / 100 \Delta t + 2\alpha)} + \frac{\rho_d \Delta x^2 M_{m,s}^i / 100 \Delta t}{\rho_d \Delta x^2 + 200 \alpha \Delta t} \quad (15)$$

M_∞ : 炉内の温湿度条件での平衡含水率 (%), M : 含水率 (%) とする。なお、温度勾配結合水移動係数については、Skaar らによって、 $\beta = \alpha E_a M / R T^2$ が示されている⁸⁾。ここで E_a : 結合水の活性化エネルギー (kJ/mol), R : 気体定数 (kJ/Kmol) である。

2.3.2 有限差分法

製材内部の断面における温度分布、水分分布を推定するにあたり、有限差分法 (Finite Difference Method, FDM) を用いる。前項で示した、熱と水分収支の基礎式を2次元に拡張する。Fig.4 に示したように、一般に長方形である製材断面を Δx 間隔のメッシュ状に分割するボックス型差分スキームを用いる。区切られた空間をセルと呼び、左から m 番目、上から n 番目のセルの温度は $T_{m,n}$ と表し、セルの位置を添字で示す。含水率についても同様である。時間ステップを Δt とし、温度、含水率の両因子について Clank Nicolson 法による差分式を作成した。製材内部のセルについて得た、温度および含水率に関する差分式を、式(14)、式(15)にそれぞれ示す。

計算に用いる熱物性パラメータの一覧を Table 1 に示す。水分を含む木材の比熱 c (kJ/kgK) は平均比熱と含水率の関係⁹⁾ から、含水率を M (%), 全乾木材の平均比熱を c_0 (kJ/kgK) として、式(16)となる。

$$c = \frac{M + 100c_0}{M + 100} \quad (16)$$

ここで、文献⁹⁾ によって $c_0 = 0.324$ とする。

Fig.4. Cells' configuration for FDM.

Table 1. Thermo physical properties.

Thermo physical properties	Symbol	Unit	Value	Reference
Specific heat	c	(kcal/kgK)	$(M+100c_0)/(M+100)$	9)
Density	ρ	(kg/m ³)	$\rho_d(1+M/100)$	
Thermal conductivity	λ	(kcal/mhK)	$(0.833M+80) \times 10^{-3}$	10)
Biot number	Bi	dimensionless	Experimental value	1)
Differential adsorption heat	Q_d	(kJ/kg)	$1.13 \times 10^{-3} \exp(-0.150M+2)$	11)
Water-transfer coefficient on moisture content gradient	α	(kg/mhK)	$8.80 \exp(0.110M-4270/T)$	12)
Water-transfer coefficient on temperature gradient	β	(kg/mhK)	$4270\alpha M/T^2$	8)
Convective water-transfer coefficient	l	(kg/m ² h)	$3.75 \exp(0.115M) \times 10^{-3} \quad (T=120^\circ\text{C})$	13)

密度 ρ (kg/m³) は, 体積変化を無視すれば, 全乾密度を ρ_d (kg/m³) とし式(17)となる。

$$\rho = \rho_d \left(1 + \frac{M}{100}\right) \quad (17)$$

熱伝導率 λ (kcal/mhK) は Kollmann らによる実験結果¹⁰⁾ から式(18)を採用する。

$$\lambda = (0.833M + 80) \times 10^{-3} \quad (18)$$

Biot 数は, 前述のとおり, 熱伝達率 h と熱伝導率 λ の比で表わされるが, 熱伝達率 h は乾燥条件に固有の値であり, 実験的に求める必要がある。微分吸湿熱 Q_d (kJ/kg) は, 結合水の木材実質との結合を切るためのエネルギーであり, 水蒸気, 水および結合水のポテンシャルエネルギー理論と Weichert による実験結果から含水率を変数として式(19)とした¹¹⁾。

$$Q_d = 1.13 \exp(-0.15M+2) \times 10^{-3} \quad (19)$$

炉内温度 T_∞ は例えば水の沸点を超える120℃で一定とし, 庫内の温湿度条件下における平衡含水率 M_∞ (%) は1~2%程度と設定する。これは炉内温度が120℃と高温であり, 換気が十分に行われているとするならば, 相対湿度は非常に低いと考えられるためである。

結合水移動係数 α (kg/mh) について, これまで多くの研究がなされているが, 移動の駆動力には含水率勾配, 温度勾配, 圧力勾配および材内の水分が有するポテンシャル勾配などで表わされている。樹種や乾燥温度によっても変化するため, その値は様々である。本報では, 中でも Skaar によって求められている Sitka spruce の繊維方向に関する水分の拡散係数から導出した値¹²⁾を採用する。Skaar によって求められている300 K (27℃) における拡散係数 D (g/cms) は式(20)で表わされる。

$$D = 0.40 \times 10^{-7} \exp(0.11M) \quad (20)$$

この実験は常温でおこなわれているが, 次の温度補正式によって他の温度にも適用できる。温度補正式として拡散係数と温度の関係を示す以下の

Arrhenius 式を用いた。

$$D = D_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (21)$$

ここに, D : 拡散係数 (cm²/s), D_0 : 基準拡散係数 (cm²/s), E_a : 水分拡散の活性化エネルギー (kJ/mol), R : 気体定数 (kJ/Kmol), T : 絶対温度 (K) である。 D に300 K (27℃) における拡散係数 D を代入し, $E_a = 35.5$, $R = 8.31 \times 10^{-3}$, $T = 300$ を代入すると, D_0 は式(22)で表わされる。

$$D_0 = 6.11 \times 10^{-2} \exp(0.11M) \quad (22)$$

式(22)を(21)に代入して, 温度 T と含水率 M をパラメータとした拡散係数 D が得られる。

$$D = 6.11 \times 10^{-2} \exp\left(0.11M - \frac{4270}{T}\right) \quad (23)$$

なお, 式(23)は繊維方向の値であるから, 繊維直交方向の値とするために2.5で除し¹²⁾, さらに単位を kg, m, h に変換して水の密度 1×10^3 kg/m³ を乗ずると, 含水率勾配結合水移動係数 α (kg/mh) は式(24)となる。

$$\alpha = 8.80 \exp\left(0.11M - \frac{4270}{T}\right) \quad (24)$$

温度勾配結合水移動係数 β (kg/mhK) は, 前項に示したように Skaar らの理論から式(25)とした⁸⁾。

$$\beta = 4270\alpha \frac{M}{T^2} \quad (25)$$

水分伝達率 l (kg/m²h) について, Choong は30℃, 40℃, 50℃, 60℃ におけるベイモミ (*Abies* spp.) の含水率と表面からの発水量 (Water Flux) との関係を実験から求めている¹³⁾。その関係を指数近似して外挿することで, ある温度に対する含水率を変数とした水分伝達率に関する式を得ることができる。Table 2 に60~120℃におけるそれらを示す。

最後に, 初期含水率 M_i (%), 初期温度 T_i (℃) については実験結果に基づいて設定する。

2.4 段階Ⅳ: 放熱段階

段階Ⅲにおいて, 目標含水率まで計算が可能とな

Table 2. Convective water-transfer coefficient.

Temperature (°C)	Convective water-transfer coefficient ($\times 10^{-3}$ kg/m ² h)
30	0.279 exp(0.0402M)
40	0.317 exp(0.0619M)
50	0.521 exp(0.0502M)
60	0.629 exp(0.0704M)
80	1.16 exp(0.0832M)
100	2.08 exp(0.0990M)
120	3.75 exp(0.115M)

ったが、その後製材を放熱する必要がある。これは製材の温度を下げ、扱いやすくするためであると同時に、製材内部と表面の含水率の高低差を調整するために行われる。放熱段階は製材の含水率が目標値に達したと判断したところで加熱を止めるところから始まり、一般に外気と材料温度との差が20℃未満になる時点で終了して、製材が乾燥機から取り出される。

Fig. 5 に放熱段階における温度分布の概要を示す。左から製材、流体、乾燥機の断熱された壁、外気として示してある。ここでは、以下の条件を仮定する。

1. 乾燥機は閉じた系であるものとし、流体の出入りはなく、乾燥機庫内の温度は一樣なものとする。
2. 製材と庫内の流体（空気）間是对流によって、庫内流体と外気間は乾燥機の壁を通した熱伝導によって熱が移動する。
3. 壁の熱伝導は低く、 Bi が1 よりも十分に大きいとすれば、庫内流体と壁の内側表面との温度差、

Fig. 5. Schematic of temperature distribution among timber surface, wall and open air.

Notes: T_i : temperature of wood at initial time T_s : temperature of surface, T_∞ : temperature inside, T_a : temperature of open air, $\uparrow$: convection.

壁の外側表面と外気との温度差は比較的小さくなるため、ここで温度差を無いものと仮定し、それぞれを T_∞ , T_a とする。

4. 製材内部温度は一樣とする。

5. 外気温度は一定とする。

ニュートンの冷却則から、製材表面温度と庫内流体温度の関係は、非定常な状態として式(26)のように表わせる。

$$\frac{dT_s}{dt} = -\frac{hA_1}{C_w}(T_s - T_\infty) \quad (26)$$

ここに、 T_s : 製材表面温度(°C), T_∞ : 庫内温度(°C), h : 熱伝達率 (kJ/m²hK), A_1 : 製材表面積 (m²), C_w : 製材の熱容量 (kJ/K) である。熱伝達率 h と木材表面積 A の積 hA は木材の側を流れる流体の速度等によって変化する値である。すなわち乾燥庫内のファンの位置、数、回転数、製材の積み方や位置などによって変化するため、値の設定には実測が必要である。また、計算の簡略のため、庫内温度 T_∞ と乾燥機の壁の内表面の温度が等しく、また壁の外表面と外気温度 T_a が等しいと仮定すると、乾燥機の壁の熱伝導から庫内温度と外気温度との関係は式(27)のとおりである。

$$\frac{dT_\infty}{dt} = -\frac{A_2 \lambda}{C_v L}(T_\infty - T_a) \quad (27)$$

ここで、 T_∞ : 庫内温度 (°C), T_a : 外気温度 (°C), λ : 乾燥機の壁の熱伝導率 (kJ/mhK), A_2 : 壁表面積 (m²), L : 壁厚さ (m), C_v : 乾燥機壁の熱容量 (kJ/K) とする。乾燥機の壁の熱伝導率 λ を乾燥機の壁厚さ L で除した $A_2 \lambda / C_v L$ は乾燥機の壁の断熱性能によって変化する値である。この値も乾燥機ごとによって異なるので、値の設定には実測を要する。外気温度 T_a を一定として式(26), (27)を解くと、製材表面温度と外気温度との関係を表す式(28)が得られる。

$$T_s = (T_0 - T_a) \{e^{-r_1 t} + e^{-r_2 t} - e^{-(r_1 + r_2)t}\} + T_a, \quad (28)$$

$$r_1 = \frac{hA_1}{C_w}, \quad r_2 = \frac{\lambda A_2}{C_v L}$$

3. ま と め

本報では、製材の乾燥に要する時間の算定式を導くことを目的として、水の沸点を超える比較的高温の乾燥方法を対象に、乾燥過程を4つの段階に区分し、各段階において伝熱モデルと算定法を示した。段階別にまとめると以下のとおりである。

1. 昇温段階では、製材を無限円筒と仮定し、対流によって加熱され、内部温度が水の沸点である100℃まで上昇するまでにかかる時間の算定法を

示した。

計算に用いる Biot 数は、熱伝達率の項を含み、これは乾燥条件や乾燥方式によって異なる特性値であるため、実測を要する。また温度伝導率 a は熱伝導率 λ 、比熱 c 、密度 ρ により決まるが、これらは初期含水率に依存することに注意が必要である。

2. 液相・気相共存段階では、昇温段階と同様に製材を無限円筒と仮定し、製材内部で気相/液相境界が加熱により進む自由境界モデルとおいた。その準定常解として液相がなくなるまでの乾燥時間を算定する方法を示した。
3. 気相段階では、製材中の温度と含水率が同時に変化し、あるところからは温度差がほぼ無くなり、段階終了を予測できない。そこで熱水分同時移動モデルを用いた差分法による非定常計算の方法を示した。また、計算に用いる各熱物性値パラメータを含水率 M を変数とした形でまとめた。
4. 放熱段階では、ニュートンの冷却則を用いて、外気温度と乾燥機庫内温度および乾燥温度から、冷却にかかる時間を算定できるように表した。ここで、製材の熱伝達率 h と、乾燥機の壁の熱伝導率 λ は乾燥装置ごとに異なるため、実測によって決定する必要がある。

文 献

- 1) Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer (6th edition), John Wiley & Sons, Danvers, 2006, pp. 272-278.
- 2) 庄司正弘: “東京大学機械工学 6 伝熱工学” (第 5 刷), 東京大学出版会, 2002, pp. 80-82.
- 3) 松本 衛: “新建築学大系10 建築物理”, 新建築学大系編集委員会編, 彰国社, 東京, 1994, pp. 127-134.
- 4) 尾崎明仁, 須貝 高, 渡辺俊行, 龍 有, 赤司泰義, 山崎 繁, 湯浅 孝, 佐藤章造: 水分ポテンシャルによる湿気移動解析－湿流の駆動力－, 日本建築学会計画系論文集, 488, pp. 17-24 (1996).
- 5) Liu, J., Avramidis, S., Ellos, S.: Simulation of heat and moisture transfer in wood during drying under constant ambient conditions. *Holzforschung* 48(3), 236-240 (1994).
- 6) 川井安生, 小林好紀, 則元 京: 高周波加熱と熱気を複合した木材乾燥法 (第 3 報) 高周波加熱下におけるスギ正角材内部の圧力推移と水分移動, 木材学会誌 48(3), 136-144 (2002).
- 7) Kawai, S., Nakato, K., Sadoh, T.: Moisture movement in wood below the fiber saturation point. *Mokuzai Gakkaishi* 24(5), 273-280 (1978).
- 8) 伏見賢美, 木方洋二, 岡野 健, 佐道 健, 竹村富男, 則元 京, 有馬孝禮, 堤 壽一, 平井信之: “木材の物理”, 文永堂出版, 1985, pp. 53-55.
- 9) 伏見賢美, 木方洋二, 岡野 健, 佐道 健, 竹村富男, 則元 京, 有馬孝禮, 堤 壽一, 平井信之: “木材の物理”, 文永堂出版, 1985, pp. 197-198.
- 10) 伏見賢美, 木方洋二, 岡野 健, 佐道 健, 竹村富男, 則元 京, 有馬孝禮, 堤 壽一, 平井信之: “木材の物理”, 文永堂出版, 1985, pp. 203-204.
- 11) 伏見賢美, 木方洋二, 岡野 健, 佐道 健, 竹村富男, 則元 京, 有馬孝禮, 堤 壽一, 平井信之: “木材の物理”, 文永堂出版, 1985, pp. 37-38.
- 12) Skaar, C.: “Wood-Water Relations”, Springer-Verlag, Berlin, 1988, pp. 178-185.
- 13) Choong T. E.: Diffusion coefficients of softwoods by steady-state and theoretical methods, *Forest Products Journal*, Jan., 21-27 (1965).