吸湿過程にある木材および木質材料の厚さ方向の 水分分布の経時変化 (第2報)[†]

実験結果との比較による熱水分移動モデルの評価^{*1}

田中 孝^{*2}, 信田 聡^{*3}

Changes of Through-thickness Moisture Distribution in Wood and Wood-based Materials in Adsorption Phase II.[†] Evaluation of heat and moisture transfer models compared to the experimental data^{*1}

Takashi TANAKA^{*2} and Satoshi SHIDA^{*3}

The objective of this study was to evaluate an activated moisture content model and an irreversible thermodynamics model that predict heat and moisture transfer through wood in the transverse direction compared with experimental data. Predictions for changes of the moisture content profile formed in a small sugi block were obtained using the two models. The predictions were compared with the unsteady-state nonisothermal moisture adsorption experimental data of sugi (*Cryptomeria japonica*) in the first report. The latter model showed better agreement, whereas the predicted moisture content curves showed a significant difference in both models. The difference of the shapes of the profiles raised the hypothesis that the Soret effect coefficient was too small. Varying the parameter used in the models, its effect on the accuracy of prediction was investigated. Equations for sorption isotherm and activation energy for bound water diffusion largely impacted the accuracy of the prediction. Using the Merakeb equation considering adsorption hysteresis for the sorption curve, the accuracy was significantly improved. For further improvement, it is necessary to reconstruct a transverse cell wall structure model for flux and a relationship between moisture content and activation energy for bound water diffusion.

Keywords: unsteady-state nonisothermal diffusion, transverse moisture transport, moisture content distribution, nondestructive evaluation, *Cryptomeria japonica*.

本研究の目的は、スギ材の吸湿過程における含水率分布の経時変化の実測値と比較することで、木材中の水分非定常非等温拡散を記述する活性水分子勾配モデルと非平衡熱力学モデルを評価することであった。木材内部に形成される含水率分布の経時変化を両モデルを用いて予測し、前報の実測値と比較した。後者のほうが実測データとの一致性が高かった。分布形状の比較により誤差の原因はソレー効果を示す係数が小さすぎることに由来すると考えられた。モデルに用いた各パラ

[†] Report I: *Mokuzai Kogyo* 67, 203-207 (2012).

^{*1} Received September 20, 2011; accepted February 8, 2012. 本報告の一部は第60回日本木材学会大会(2010年3月, 宮崎)および Forest Products Society 64th international convention 2010 (2010年6月, 米国ウィスコンシン州マディソン)で発表した。

^{*2} 秋田県立大学木材高度加工研究所 Institute of Wood Technology, Akita Prefectural University, Noshiro 016-0876, Japan

^{*3} 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

メータを変動させ、予測精度に及ぼす影響を検討した。吸着等温線と活性化エネルギーの関係式が最も大きな影響を及ぼした。精度の改善を図るため、吸着等温線をヒステリシスを考慮した式に変更したところ、精度が大幅に改善された。さらに精度を向上させるためには、含水率と活性化エネルギーの関係や、木材の横断面方向の細胞壁モデルについて再検討を加える必要性が示唆された。

記 号

- c : 比熱容量, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 D : 繊維直交方向の水分の見かけの拡散係数, m^2/s
 D_b : 結合水の拡散係数, m^2/s
 E_b : 結合水の拡散のための活性化エネルギー, J/mol
 E_v : 微分吸着熱, J/kg
 H : 相対湿度, %
 J_M : 水分流束, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
 J_T : 熱流束, W/m^2
 K_M : 含水率勾配基準の見かけの水分移動係数, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\%)$
 M : 含水率, %
 M_c : チャンバーの温湿度に対応する木材の平衡含水率, %
 M_{cl} : 左チャンバーの温湿度に対応する木材の平衡含水率, %
 M_{cr} : 右チャンバーの温湿度に対応する木材の平衡含水率, %
 R : 気体定数, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
 T : 温度, K
 T_c : チャンバーの温度, K
 T_{cl} : 左チャンバーの温度, K
 T_{cr} : 右チャンバーの温度, K
 t : 時間, s
 Δt : 時間の分割幅, s
 V_a : 空隙率
 x : 距離, m
 Δx : 距離の分割幅, m
 α' : 湿気伝達率, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\%)$
 α : 熱伝達率, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
 λ : 熱伝導率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
 ρ_0 : 木材の全乾密度, kg/m^3
 ρ : 木材の密度, kg/m^3
 ρ_{water} : 水の密度, kg/m^3
 φ : ソレー効果を示す係数, $\text{m}^2\cdot\% / (\text{s}\cdot\text{K})$

1. 緒 言

木材に含まれている水分の拡散現象を定量的に予測することは、効率的な人工乾燥方法の開発や建築

物の温熱環境解析に重要であることから、これまで多くの研究がなされてきた。材料内を物質が移動する場合、一般に温度の勾配、化学ポテンシャルの勾配、電位の勾配が駆動力であるが¹⁾、木材を乾燥するときや建築物の壁体等として利用している場合には温度の勾配と化学ポテンシャルの勾配が同時に生じるため、温度勾配によって物質流束が引き起こされるソレー効果などの現象が生じる。これまで木材内部に温度勾配と化学ポテンシャル勾配が同時に生じる場合の非定常な水分拡散を説明するためのいくつかの研究が行われてきた。Skaar ら²⁾ は活性水分子勾配に基づく非定常非等温拡散モデルを提案した。Nelson³⁾ や Siau ら⁴⁾ は化学ポテンシャル勾配に基づく非定常非等温拡散モデルを導いた。Avramidis ら⁵⁾ は Siau モデルに対して若干の改善を施した。

モデルによる予測値と実験値との整合性に関する研究⁵⁻⁷⁾ もいくつか行われてきた。Siau ら⁸⁾ は、Skaar ら、Nelson、Siau らの提案したモデルを用いたときの流束の予測値を実験値と比較し、化学ポテンシャル勾配に基づくモデルに非平衡熱力学的な考察に基づく改良を加えたもの（以下 Siau モデル）が最も良好な結果となることを示した。Avramidis ら⁹⁾ は、若干の変更を加えた Siau モデルを用いて予測した平均含水率の経時変化をベイマツ (*Pseudotsuga menziesii*) 心材による実験値と比較したところ、両者がほぼ一致したことを報告した。

しかし上述のような予測値と実測値の整合性に関する研究は、定常時の水分流束や平均含水率の経時変化に基づいて比較されるのみで、木材内部に形成される含水率分布については実測との比較がなされてこなかった。しかし木材の反りや割れ、建築物の内部結露等は材料内部に形成される含水率の傾斜により引き起こされるため、含水率分布の予測値が現実の実験値とどれほど適合しているか検証することは極めて重要なことである。

近年、X線を用いた技術が発達し、木材中の含水率分布を従来よりも簡便に求めることが出来るようになった。本報告では、これまでに提案された代表的なモデルである Skaar モデルと Siau モデルを用いて水分の非定常非等温拡散の数値計算を行い、前

報¹⁰⁾ で得た木材の吸湿過程の含水率分布の経時変化との比較を行った。モデルの妥当性と改善可能性について検討した。

2. シミュレーション方法

2.1 木材内部の水分の非定常非等温拡散方程式

繊維飽和点以下の木材内部における水分の非定常非等温拡散は、以下の連立2階偏微分方程式で表される。

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varphi \frac{dT}{dx} + D \frac{dM}{dx} \right) \quad (1)$$

$$c\rho = \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{E_v \rho_0}{100} \frac{\partial M}{\partial t} \quad (2)$$

Skaar モデルでは、 φ は以下の式で表される。

$$\varphi = D \left(\frac{M}{RT + 290M} \right) \frac{E_b}{T} \quad (3)$$

Siau モデルでは、 φ は以下の式で表される。

$$\varphi = D \cdot \frac{H}{RT} \cdot \left(\frac{\partial M}{\partial H} \right)_T \cdot \frac{E_b}{T} \quad (4)$$

係数 φ に使われるパラメータ D , E_b , H , $\partial M / \partial H$ を M と T の関数として表すための関係式は、全て Avramidis ら⁹⁾ が用いたものと同じものを用いた。他のパラメータについてはアペンディクスに詳細を記した。

連立2階偏微分方程式の数値計算法としては、差分法のなかでも最も立式の単純な陽解法¹¹⁾ とし、試験体の水分移動方向を11個の要素に分割し、時間には前進差分、場所には中心差分を適用して、要素 m の時間ステップ n 番目における温度を T_m^n , 含水率を M_m^n , ソレ効果を示す係数を φ_m^n , 繊維直行方向の水分の見かけの拡散係数を D_m^n としたとき

$$\begin{aligned} \frac{M_m^{n+1} - M_m^n}{\Delta t} = & \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{\varphi_{m-1}^n + \varphi_m^n}{2} \cdot \frac{T_{m-1}^n - T_m^n}{\Delta x} \right. \\ & \left. - \frac{\varphi_m^n + \varphi_{m+1}^n}{2} \cdot \frac{T_m^n - T_{m+1}^n}{\Delta x} \right) \\ & + \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{D_{m-1}^n + D_m^n}{2} \cdot \frac{M_{m-1}^n - M_m^n}{\Delta x} \right. \\ & \left. - \frac{D_m^n + D_{m+1}^n}{2} \cdot \frac{M_m^n - M_{m+1}^n}{\Delta x} \right) \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c\rho \frac{T_m^{n+1} - T_m^n}{\Delta t} = & \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{K_{T_{m-1}} + K_{T_m}}{2} \cdot \frac{T_{m-1}^n - T_m^n}{\Delta x} \right. \\ & \left. - \frac{K_{T_m} + K_{T_{m+1}}}{2} \cdot \frac{T_m^n - T_{m+1}^n}{\Delta x} \right) \\ & + \frac{E_v \rho_0}{100} \cdot \frac{M_m^{n+1} - M_m^n}{\Delta x} \quad (6) \end{aligned}$$

で表される差分式を用いた。

2.2 木材表面における水分と熱の移動

境界層から木材表面へと移動する水分流束 J_M と熱流束 J_T は以下の式で表される。

$$J_M = \alpha' (M_c - M) \quad (7)$$

$$J_T = \alpha (T_c - T) \quad (8)$$

したがって左端の要素の含水率と温度の差分式は以下のように示される。

$$\begin{aligned} \frac{M_1^{n+1} - M_1^n}{\Delta t} = & \frac{1}{\Delta x} \alpha' (M_{cl} - M_1^n) \\ & - \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{\varphi_1^n + \varphi_2^n}{2} \cdot \frac{T_1^n - T_2^n}{\Delta x} \right) \\ & - \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{D_1^n + D_2^n}{2} \cdot \frac{M_1^n - M_2^n}{\Delta x} \right) \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c\rho \frac{T_1^{n+1} - T_1^n}{\Delta t} = & \frac{1}{\Delta x} \alpha (T_{cl} - T_1^n) \\ & - \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{K_{T_1} + K_{T_2}}{2} \cdot \frac{T_1^n - T_2^n}{\Delta x} \right) \\ & + \frac{E_v \rho_0}{100} \cdot \frac{M_1^{n+1} - M_1^n}{\Delta t} \quad (10) \end{aligned}$$

右端の要素の含水率と温度の差分式は以下のように示される。

$$\begin{aligned} \frac{M_{11}^{n+1} - M_{11}^n}{\Delta t} = & \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{\varphi_{10}^n + \varphi_{11}^n}{2} \cdot \frac{T_{10}^n - T_{11}^n}{\Delta x} \right) \\ & + \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{D_{10}^n + D_{11}^n}{2} \cdot \frac{M_{10}^n - M_{11}^n}{\Delta x} \right) \\ & + \frac{1}{\Delta x} \alpha' (M_{cr} - M_{11}^n) \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c\rho \frac{T_{11}^{n+1} - T_{11}^n}{\Delta t} = & \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{K_{T_{10}} + K_{T_{11}}}{2} \cdot \frac{T_{10}^n - T_{11}^n}{\Delta x} \right) \\ & + \frac{E_v \rho_0}{100} \cdot \frac{M_{11}^{n+1} - M_{11}^n}{\Delta t} \\ & + \frac{1}{\Delta x} \alpha (T_{cr} - T_{11}^n) \quad (12) \end{aligned}$$

となる。

2.3 数値計算の実行

数値計算には市販の表計算ソフト (Microsoft Excel 2007 SP2, Microsoft Corporation) を用いた。試験体の11要素の M , T , ρ_0 , V_a , E_b , D , φ , λ , E_v , c , H , $\partial M / \partial H$ およびそれらの途中計算式をスプレッドシート上の198列に配置し、時間軸として行方向に36001行を確保し、左部の外気温度293 K, 相对湿度65%, 右部の外気温度313 K, 相对湿度30%とし、試験体の初期含水率は便宜的に全要素で0%とし、試験体の初期温度は全要素で300 Kとし、 $\Delta t = 2$, $\Delta x = 0.001$ として数値計算を行った。36001行まで計算が完了したら最終行の数値を第1行へ代入し、再び計算を繰り返すことで最終的に260時間

後までの含水率と温度の数値計算を実行した。

3. 実験

3.1 試験体

全乾スギ辺材（密度 0.38 g/cm^3 ）から $11 \text{ mm (R)} \times 11 \text{ mm (T)} \times 11 \text{ mm (L)}$ の小試験片を6体作製した。木口面および柀目面にパラフィンを塗布して封鎖し、半径方向のみ水分が移動するようにした。

3.2 試験方法

試験体を断熱材でできた板に嵌め込み、この断熱材により隔てられた両側の空間の温湿度条件を 20°C 、 $65\% \text{ RH}$ および 40°C 、 $30\% \text{ RH}$ に設定し、243時間設置した。その間、一定時間ごとに試験体を取り出し、X線を用いた方法¹²⁾により半径方向の含水率分布を計測した。

4. 結果と考察

シミュレーションにより得られた試験体の平均含水率の経時変化の予測値を Fig. 1 に示す。比較のため前報における実測値についても示した。Avramidis の得た結果⁹⁾とは異なり、本実験では予測値は実測値と比べて過大であった。この過大の原因としては、スギはベイマツよりも密度が低い点、含水率範囲が $0\% \sim 10\%$ という低含水率領域であった点、吸湿過程であるにもかかわらず、シミュレーションにおいてチャンバーの温湿度に対応する平衡含水率の計算に用いた Hailwood-Horrobin 式ではヒステリシスの影響が考慮されていない点が考えられる。

シミュレーションにより得られた試験体の含水率分布の経時変化の予測値を Fig. 2 および Fig. 3 に、実測値を Fig. 4 に示す。予測値は、どちらのモデルを用いてもどの位置においても実測値よりも過大であった。ここでシミュレーションの精度の指標として、各要素における予測値と実測値の残差をもとに

Fig. 1. Experimental and predicted moisture content.

計算した残差の二乗和（以下 RSS）を考える。Skaar モデルでは19時間経過時点で59.1、72時間経過時点では143.6に対し、Siau モデルでは19時間経過時点で58.4、72時間経過時点で134.3であった。Skaar モデルと Siau モデルを比較すると、Siau モデルのほうがわずかに誤差の小さい予測値が得られた。含水率分布の経時変化について、Siau モデルのほうがより良い予測値が得られることが示唆された。

Fig. 2. Predicted temperature and moisture content profiles using the Skaar model.

Fig. 3. Predicted temperature and moisture content profiles using the Siau model.

Fig. 4. Experimental moisture content profiles.

開始から19時間経過時の Siau モデルによる予測値と実測値を比較すると、試験体の左側へいくほど実測結果がシミュレーション結果を下回り、右側へいくほど実測結果がシミュレーション結果を上回るという特徴的な差異が見られた。これは予測値が実測値に比べて低温側で高く、高温側で低くなってしまったと言い換えることができる。本実験では試験体に対して含水率勾配とは逆向きの温度勾配を与えていることから、ソーレ効果を示す ϕ が本当はもっと大きい可能性を示唆している。

モデルに用いたパラメータがシミュレーションの精度にどのような影響を与えるのか調べるために、モデル中のパラメータ ρ_0 , D_b , E_b , λ , M_c , α' , α , H , $\partial M/\partial H$ をそれぞれ10%増減させたときの各経過時間における RSS を算出した。このうち2時間経過後、6時間経過後、19時間経過後、72時間経過後、243時間経過後の RSS の平均値を Fig. 5 に示す。 M_c と E_b を10%変動させたとき、RSS はいずれも50~100程度変動した。この変動は Skaar モデルまたは Siau モデルの選択による変動幅よりもはるかに大きく、より良い予測値を得るには E_b と M_c の式を改善することが有効な手段であると考えられる。

ρ_0 と α' を10%変動させたときの RSS の変動はいずれも約10であり、シミュレーションの精度にいくらかの影響を及ぼした。これらの関係式を改善することは、より良い精度を得るためにある程度有効な可能性がある。とくに ρ_0 は樹種間および樹種内のばらつきが大きいこと、同一個体内の変動も大きいことから、正確な把握が重要と考えられる。

D_b , λ , α , H , $\partial M/\partial H$ をそれぞれ10%変動させたときの RSS の変動はいずれも5以下であった。これらはシミュレーションの精度にはほとんど影響を及ぼさなかった。したがってこれらを表す関係式の改善については、シミュレーションによる予測値

の精度向上という観点においては重要度が低いと考えられる。

最も影響が強いと考えられた E_b と M_c に関する関係式を改善することで、シミュレーションによる予測値の精度向上を試みた。 M_c については、ヒステリシスを考慮した Merakeb による完全サイクル時の吸湿方向の関係式¹³⁾

$$M_c = A' \exp \left(B' \cdot \ln \frac{H}{100} \cdot \exp \left(C' \frac{H}{100} \right) \right) \quad (13)$$

$$A' = -0.13T + 71 \quad (14)$$

$$B' = 0.0013T + 0.63 \quad (15)$$

$$C' = -0.0054T + 3.24 \quad (16)$$

を M_c の改善式とし、さらに以下の式を導出した。

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial H} &= \frac{A'B'}{100} \exp \left(B' \cdot \ln \frac{H}{100} \cdot \exp \left(C' \frac{H}{100} \right) \right) \\ &\quad \left(C' \ln \frac{H}{100} \exp \left(C' \frac{H}{100} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{100}{H} \exp \left(C' \frac{H}{100} \right) \right) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} H &= 0.000964k^6 + 0.03021k^5 + 0.5460k^4 + 5.278k^3 \\ &\quad + 28.92k^2 + 85.71k + 108.4 \quad (k < -3.3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H &= 2.032k^5 + 16.61k^4 + 41.71k^3 + 29.91k^2 + 29.24k \\ &\quad + 100.2 \quad (k \geq 3.3) \end{aligned} \quad (18)$$

$$k = \frac{1}{B'} \ln \frac{M}{A'} \quad (19)$$

E_b については、Siau の含水率-活性化エネルギー図¹⁴⁾に基づいて含水率の1次式でなく含水率の3次式で ($R^2 = 0.999$ となるように) 近似した式

$$E_b = -0.001178M^3 + 0.05524M^2 - 1.060M + 41.67 \quad (20)$$

を作成し、これを用いてシミュレーションを行い、開始から2時間経過後、6時間経過後、19時間経過後、72時間経過後、243時間経過後の RSS の平均値を算出したものを Table 1. に示す。Merakeb の式

Fig. 5. Effect of parameter change on the residual sum of squares between experimental and predicted moisture content profiles.

Table 1. Residual sum of squares between experimental and predicted moisture content profiles using the Merakeb equation and the new E_b equation.

Diffusion model	M_c equation	E_b equation	RSS
Skaar model	Hailwood-Horrobin	$-290M + 38500$	84.5
	Merakeb	$-290M + 38500$	25.9
	Hailwood-Horrobin	$0.001778M^3 + 0.05524M^2 - 1.060M + 41.67$	85.3
	Merakeb	$0.001778M^3 + 0.05524M^2 - 1.060M + 41.67$	23.6
Siau model	Hailwood-Horrobin	$-290M + 38500$	79.1
	Merakeb	$-290M + 38500$	22.0
	Hailwood-Horrobin	$0.001778M^3 + 0.05524M^2 - 1.060M + 41.67$	79.7
	Merakeb	$0.001778M^3 + 0.05524M^2 - 1.060M + 41.67$	24.2

を用いることで RSS は大きく改善された。シミュレーションの際に Hailwood-Horrobin 式を用いることは大きな誤差を生じるため、ヒステリシスを考慮した関係式を用いるのが適切であることが示された。

E_b の改善式を用いると、Skaar モデルで Merakeb 式を用いたときには精度が改善されたが、それ以外の 3 パターンでは精度がわずかに悪化した。Siau の含水率-活性化エネルギー図は、少なくとも非定常非等温拡散モデルという枠組みの中では結合水が拡散するための活性化エネルギーを十分に表していない可能性が示唆された。

ソレー効果を示す φ は、Skaar モデルでは ρ_0 , D_b と E_b に依存し、Siau モデルではそれらに加えて H と $\partial M/\partial H$ に依存する。このうち D_b , H , $\partial M/\partial H$ については、変動させても RSS にはほとんど影響を及ぼさなかったことから、ソレー効果を示す φ を改善するためには ρ_0 と E_b を改善することが必要と考えられる。 E_b に関しては、Siau の含水率-活性化エネルギー図は含水率 10% のときの活性化エネルギーが 35600 J/mol であるという仮定のもとに作成されており、その仮定を再検討する必要があると考えられる。 ρ_0 に関しては、 D を D_b と ρ_0 で表す際に Siau の細胞壁の無限長直方体モデル¹⁵⁾ を仮定しており、木材の横断面方向の組織構造が ρ_0 と D の関係に及ぼす影響を再検討する必要があると考えられる。

5. 結 論

スギ材の吸湿過程において形成される含水率分布の経時変化について Skaar モデルおよび Siau モデルによる予測を行い、得られた予測値を前報における実測値と比較した。Siau モデルによる予測値のほうがより実験値に近かったが、いずれも誤差が大きく、含水率分布の形状も異なった。形状の比較によりこの誤差の原因はソレー効果を示す係数 φ の値が小さすぎることに由来するものである可能性が考

えられた。モデルに用いた各パラメータを変動させたところ、 M_c と E_b の変動が予測精度に対してもっとも大きな影響を及ぼした。予測精度向上のためには、使用するモデルの選択だけでなく、シミュレーション結果に大きな影響を及ぼすパラメータの精度向上が必要であることが示された。 M_c の関係式をヒステリシスを考慮した式に変更したところ、予測精度を大幅に改善することができた。Hailwood-Horrobin 式を少なくとも吸湿過程の水分非定常非等温拡散モデルに用いることは不適切であることが示唆された。 E_b の関係式を Siau の含水率-活性化エネルギー図を正確に表現した 3 次式に変更したところ、予測精度はほとんど変わらなかった。ソレー効果を示す係数 φ はそのパラメータである ρ_0 と E_b に依存するため、 φ の精度向上を目指すためには、含水率と活性化エネルギーの関係や、木材の横断面方向の組織構造モデルについて再検討を加える必要性が示唆された。

文 献

- 1) Forland, K. S., Forland, T., Ratkje, S. K.: “わかりやすい非平衡熱力学”, 伊藤靖彦監訳, オーム社, 東京, 1992, pp. 100-104.
- 2) Skaar, C., Siau, J. F.: *Wood Sci. Technol.* **15**, 105-112 (1981).
- 3) Nelson, R. M.: *Wood Sci. Technol.* **20**, 309-328 (1986).
- 4) Siau, J. F.: *Wood Sci. Technol.* **26**, 325-328 (1992).
- 5) Siau, J. F., Bao, F.: *Wood Fiber Sci.* **18**, 84-89 (1986).
- 6) Avramidis, S., Kuroda, N., Siau, J. F.: *Wood Fiber Sci.* **19**, 407-413 (1987).
- 7) Avramidis, S., Siau, J. F.: *Wood Sci. Technol.* **21**, 329-334 (1987).
- 8) Siau, J. F., Avramidis, S.: *Wood Sci. Tech-*

- nol.* **27**, 131-136 (1993).
- 9) Avramidis, S., Hatzikiriakos, S. G., Siau, J. F.: *Wood Sci. Technol.* **28**, 349-358 (1994).
 - 10) 田中 孝, 信田 聡: 木材工業 **67**(5), 203-307 (2012).
 - 11) 鈴井修一: “建築環境学 2”, 木村建一編, 丸善, 東京, 1993, pp. 118-119.
 - 12) Tanaka, T., Avramidis, S., Shida, S.: *J. Wood Sci.* **55**, 69-73 (2009).
 - 13) Merakeb, S., Dubois, F., Petit, C.: *Wood Sci. Technol.* **43**, 575-589 (2009).
 - 14) Siau, J. F.: “Wood: Influence of moisture on physical properties”, Virginia Polytechnic Institute and State University, N.Y., 1995, p. 115.
 - 15) Siau, J. F.: “Flow in Wood”, Syracuse University Press, N.Y., 1971, pp. 90-92.
 - 16) Siau, J. F.: “Wood: Influence of moisture on physical properties”, Virginia Polytechnic Institute and State University, N.Y., 1995, pp. 114-115.
 - 17) Siau, J. F.: “Wood: Influence of moisture on physical properties”, Virginia Polytechnic Institute and State University, N.Y., 1995, p. 17.
 - 18) Siau, J. F.: “Wood: Influence of moisture on physical properties”, Virginia Polytechnic Institute and State University, N.Y., 1995, p. 87.
 - 19) Siau, J. F.: “Wood: Influence of moisture on physical properties”, Virginia Polytechnic Institute and State University, N.Y., 1995, p. 115.
 - 20) Siau, J. F.: “Wood: Influence of moisture on physical properties”, Virginia Polytechnic Institute and State University, N.Y., 1995, pp. 138-139.
 - 21) Siau, J. F.: “Wood: Influence of moisture on physical properties”, Virginia Polytechnic Institute and State University, N.Y., 1995, pp. 128-129.
 - 22) Lee, W. H., Okano, T., Ohta, M.: *Mokuzai Gakkaishi* **37**, 101-108 (1991).
 - 23) “建築計画原論 II”, 渡辺 要編, 丸善, 東京, 1965, p. 66.
 - 24) “木材工業ハンドブック改訂 4 版”, 森林総合研究所監修, 丸善, 東京, 2004, p. 117.

アペンディクス

均一な密度を持つ木材の繊維直交方向の見かけの水分拡散係数は、壁孔の影響を無視した場合、細胞壁の無限長直方体モデル¹⁵⁾に適用すると、

$$D = \frac{D_b}{(1 - V_a)(1 - \sqrt{V_a})} \quad (21)$$

で与えられる。ここで D_b と V_a については以下の式で表される^{16, 17)}。

$$D_b = 7 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-E_b}{RT}\right) \quad (22)$$

$$V_a = 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{water}}} (0.653 + 0.01M) \quad (23)$$

熱伝導率には $M < 40$ のときに成立する以下の Maclean 経験式¹⁸⁾を用いた。

$$\lambda = \frac{\rho}{\rho_{\text{water}}} (0.200 + 0.0038M) + 0.024 \quad (24)$$

結合水が拡散するときの活性化エネルギーは、 $M \geq 5\%$ のときに以下の式となる¹⁹⁾。

$$E_b = 38500 - 290M \quad (25)$$

平衡含水率曲線は、Hailwood-Horrobin の one hydrate model ($n=1$) を用いて以下の式で与えられる²⁰⁾。

$$\frac{M}{100} = \frac{0.018}{W} \left(\frac{K_1 K_2 h}{1 + K_1 K_2 h} + \frac{K_2 h}{1 - K_2 h} \right) \quad (26)$$

ただし、

$$h = \frac{H}{100} \quad (27)$$

$$W = 1.448351 - 0.009674T + 0.000019T^2 \quad (28)$$

$$K_1 = -45.6385 + 0.321T - 0.0005T^2 \quad (29)$$

$$K_2 = -0.205274 + 0.004976T - 0.000006T^2 \quad (30)$$

これらを変形および微分して以下の式が得られる。

$$H = \frac{BM - 1 + \sqrt{(1 - BM)^2 + 4ACM^2}}{2CM} \quad (31)$$

$$\left(\frac{\partial M}{\partial H} \right)_T = (A + CH^2) (A + BH - CH^2)^2 \quad (32)$$

ただし、

$$A = \left(\frac{W}{0.018} \right) \left(\frac{1}{K_2(K_1 + 1)} \right) \quad (33)$$

$$B = \frac{W}{1.8} \left(\frac{K_1 - 1}{K_1 + 1} \right) \quad (34)$$

$$C = \frac{WK_1K_2}{180(K_1 + 1)} \quad (35)$$

微分吸着熱は、自由水基準の微分吸着熱²¹⁾に水の 30℃での蒸発熱 2.43×10^6 J/kg を加えて以下の式を用いた。

$$E_v = 1.17 \times 10^6 \exp(-0.14M) + 2.43 \times 10^6 \quad (36)$$

湿気伝達率は, Lee ら²²⁾ がおおむね $0.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \%)$ という値を得ており, 単位を換算して以下の値を用いた。

$$\alpha' = 1.4 \times 10^{-7} \quad (37)$$

熱伝達率には以下の値を用いた²³⁾。

$$\alpha = 23.2 \quad (38)$$

木材の比熱容量には, 以下の式を用いた²⁴⁾。

$$c = \frac{-21200 + 485T + 4180M}{100 + M} \quad (39)$$

木材の全乾密度 ρ_0 には以下の値を用いた。

$$\rho_0 = 380 \quad (40)$$

このとき水分を含めた木材の密度は, 以下の式で与えられる。

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{M}{100} \right) \quad (41)$$

気体定数 R には以下の値を用いた。

$$R = 8.31 \quad (42)$$