

[木材学会誌 Vol. 54, No. 2, p. 93-96 (2008)]

含水率より求めた材温を用いた乾燥過程のシミュレーション*1

宋 周勳*2,3, 中尾哲也*2

Simulation of the Drying Process Using Temperature in Wood as Calculated from Moisture Content*1

Joo Hoon SONG*2,3 and Tetsuya NAKAO*2

The three-dimensional diffusion equation was solved by the finite difference method, and then the moisture content of structure lumber during drying was calculated. The moisture content was converted into relative humidity. It was assumed that the temperature in wood was equal to the wet-bulb temperature. The change of moisture content was calculated by using the average temperature in the wood. As a result, the diffusion coefficient at various temperatures in the process of intermediate temperature drying became the most constant value. Moreover, a corresponding experimental result for temperature was obtained in the process of high temperature drying.

Keywords: diffusion coefficient, finite difference method, wet-bulb temperature.

3次元の拡散方程式を差分法で解き、乾燥過程の構造材の含水率を計算した。その際、拡散係数の温度依存性に必要な材温については、含水率を相対湿度に変換し、その湿球温度が材温に相当するとして計算を行った。材全体の温度の平均値を用いて含水率の変動を計算した結果、中温乾燥の過程における様々な温度での拡散係数が最も一定の値となった。また、高温乾燥の過程においては、材温の実験結果と良く一致する結果が得られた。

1. 緒 言

前報¹⁾において、汎用表計算ソフト Excel を用いて3次元の拡散方程式を、現実的な境界条件の基で差分法により解き、含水率変化および水分傾斜を計算できるプログラムを開発した。さらに、この差分法で求めた水分変化量および有限要素法から求めた断面内の応力値から、ドラインゲット量を計算し、

乾燥中の構造材断面内に発生する応力を計算した。最終的に、ドラインゲットを考慮した収縮率を求めることに成功した。

その際、大きな問題点として、材温を当初の雰囲気湿度の湿球温度に等しいとする仮定で計算を行っていることが挙げられる。この仮定は、材に自由水が存在する繊維飽和点以上では正しいと考えられるが、繊維飽和点以下では補正が必要である。材温の補正については、Bramhall²⁾の論文に理論的な結果が記載されているが、実験的な検討はなされていない。

そこで本研究では、計算された含水率を相対湿度に変換し相当する湿球温度を材温とする、単純な手法で計算を行い熟練者による実験結果^{3,4)}と比較を行った。

2. 理論解析

前報同様、空間 XYZ を縦(行)、時間を横(列)

*1 Received April 2, 2007; accepted November 14, 2007. 本研究の一部は第57回日本木材学会大会(2007年8月、広島)で発表した。

*2 島根大学大学院総合理工学研究科 Graduate School of Science and Engineering, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan

*3 Present Address: 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

にとり, 3次元の拡散方程式を差分法で解き材内の含水率を計算した。分割数は空間で5×5(断面方向)×11(長さ方向)とした。拡散係数の温度依存性なども, 前報と同様である。

本研究においては, 材温を求めるため上記の手法で計算された含水率 M を相当する相対湿度 h に変換し, さらにその湿度を相当する水蒸気圧に変換し温度を求める手法を用いた。

すなわち, まず Bramhall の論文記載の吸着等温線の理論式,

$$h = \exp(K_2 K_1^{0.92M} + K_3) \quad (1)$$

$$K_1 = 1.0327 - 0.000674T \quad (2)$$

$$K_2 = 17.884 - 0.1432T + 0.0002363T^2 \quad (3)$$

$$K_3 = -0.0251 \quad (4)$$

ここに h は相対湿度 (%), M は含水率 (%), T は絶対温度 (K), K_1, K_2, K_3 は Bradley 式の熱伝導率 ($\text{cal}/\text{cm} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$) である。式(1)を用いて, 計算で得られた含水率 M を相対湿度 h に変換した。さらに相対湿度の定義より,

$$h = \frac{P_u}{P_d} \quad (5)$$

の関係をいれれば, 乾球温度に相当する飽和蒸気圧 P_d に対し, P_u が求められる。ここで, P_u は材内の含水率を蒸気圧に変換したパラメータであり, 材内の含水率が繊維飽和点もしくはそれ以上であれば, h は1であり, P_u は P_d に等しい。その際, 前報に述べたように材温は湿球温度に等しい。また, 材内の含水率が平衡に達していれば, P_u は湿球温度に相当する飽和蒸気圧 P_w に等しくなる。その際, 材温は乾球温度に等しくなるような関係式を求める。

そこで, 新たに,

$$P = P_w + (P_d - P_u) \quad (6)$$

と定義し, この P を温度に変換すれば, 上の条件が満たされる。飽和蒸気圧と温度の関係は, Bramhall の論文に記載された関係式,

$$P = \exp\left(20.9006 - \frac{5204.9}{T}\right) \quad (7)$$

を用いた。ここで, P は飽和蒸気圧の温度依存性を特定する式である。

このように, 差分法で計算された材内各部位のある時間における含水率より材温を求めた。その後, 教科書記載の Egner⁵⁾ の結果を用いて, この時間以降の拡散係数を新たに求め計算を行った。その際, 各部位の拡散係数の算出に, 各部位の材温をそのまま用いる手法と, 単純ではあるが熱伝導を考慮して材全体の温度の平均値を用いる手法両者を行った。

3. 結果と考察

著者が検索した範囲では, 乾燥中の材温の測定結果は少ない。さらに, その結果の妥当性にも十分な検証がなされたとは言いがたい。そこで本研究では, まず前報で用いた河崎による, 中温乾燥の含水率の実験結果⁴⁾を用い, 材温を湿球温度に等しいとした前報の結果と, 本研究の結果を比較することとした。

含水率の計算結果を, 実験結果と共に Fig. 1~Fig. 4 に示す。ここには, 前報の手法と材全体の材温の平均値を用いて拡散係数を算出した結果を示す。

Fig. 1 にヒノキ (初期温度35°C, 45°C, 60°C), Fig. 2 にスギ (初期温度55°C, 70°C) の乾燥経過およびその計算結果を示す。本研究の結果をそれぞれ Fig. 3, Fig. 4 に示す。

この結果で, 直ちに本研究の手法の方が優れているとの判断はできない。そこで, 実験結果に適合させるために用いた拡散係数の値を各材ごとに Fig. 5 に示す。個々の材, 樹種ごとの相違はあると考えられるが, シミュレーションの性格上, 乾燥温度が異なってもほぼ一定の拡散係数が得られることが望ましいと考えられる。その点から判断すると, 湿球温度, 材全体の温度の平均値, 各部位の材温を材温とし計算した手法の中で, 本研究で提案した材全体の温度の平均値を用いた手法が, 最も良好な結果を与えていると判断できる。

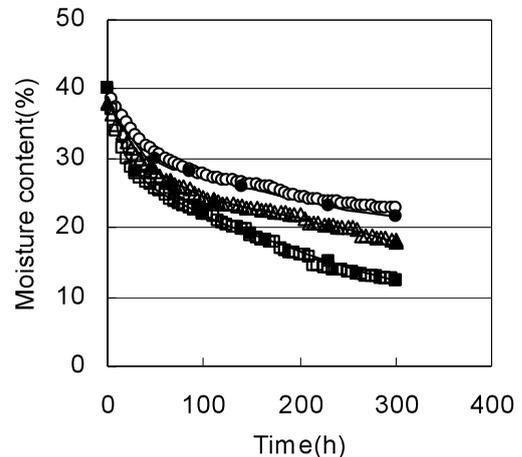


Fig. 1. Experimental and theoretical drying processes for Hinoki pillar lumber. Results are as described in the previous study¹⁾.

Legend: ●, ▲, and ■: experimental results. ○, △, and □: theoretical results. Initial dry-bulb temperatures were 35°C, 45°C, and 60°C.

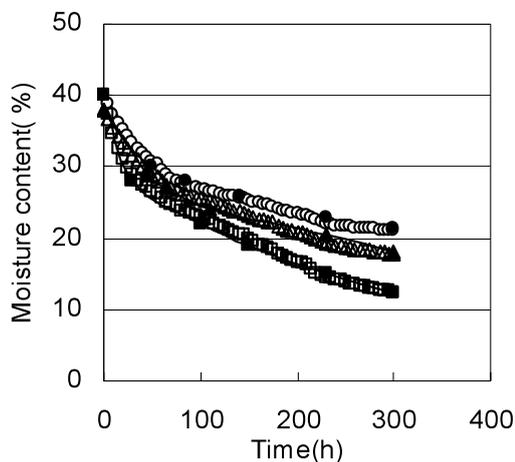


Fig. 2. Experimental and theoretical drying processes for Hinoki pillar lumber. The moisture content was calculated by using the average temperature in wood.

Legend: Same as Fig. 1.

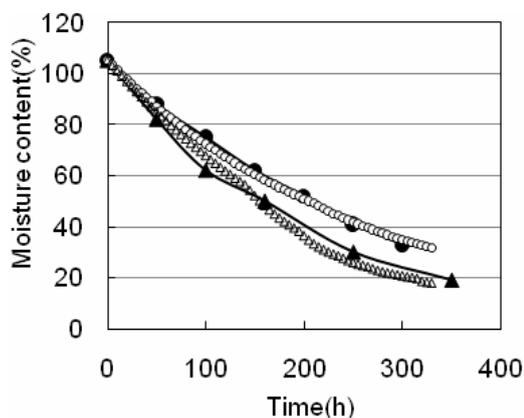


Fig. 3. Experimental and theoretical drying processes for Sugi pillar lumber. Results are as described in the previous study¹⁾.

Legend: ●, ▲: experimental results. ○, △: theoretical results. Initial dry-bulb temperatures were 55°C, 70°C.

吉田ら³⁾は、高温乾燥において含水率および材温の実験結果を発表している。そこで、この結果と本研究の計算結果を比較した。含水率の結果を Fig. 6 に、材温の結果を Fig. 7 に示す。

上記の中温乾燥の結果同様、含水率の計算においては、どの手法が適当かは判断が困難である。

しかしながら、材温そのものの結果では明らかに材全体の温度の平均値を求めた結果が、実験結果と良好な一致を示している。

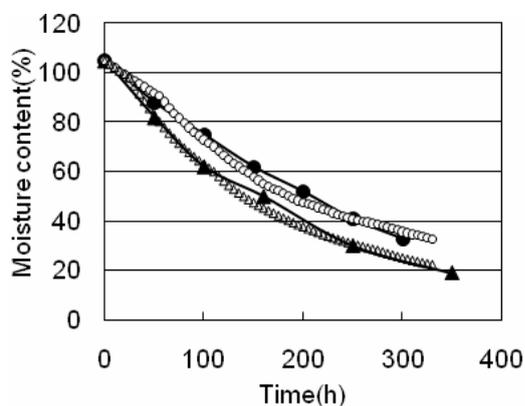


Fig. 4. Experimental and theoretical drying processes for Sugi pillar lumber. The moisture content was calculated by using the average temperature in wood.

Legend: Same as Fig. 3.

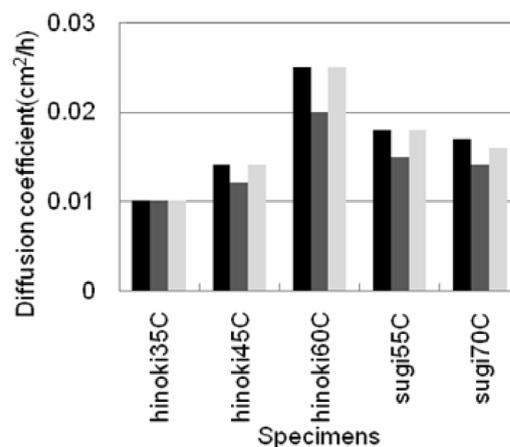


Fig. 5. Calculated diffusion coefficients for Hinoki, Sugi pillar timber.

Legend: ■: wet-bulb temperature; ■: average temperature; ■: temperature of each section.

総じて、限定された実験結果との比較のもとでの考察に止まるが、含水率を湿度に変換し相当する湿球温度を材温とし、その材全体の温度の平均値を用いる単純な手法で、実験結果を前報より良好な形で再現できたと考える。

Bramhall の論文では、1次元の拡散について、熱伝導を考慮したさらに詳細な理論的な検討がなされているが、今後、このような面を取り入れ、さらに精密なシミュレーション手法を構築する必要があると考えられる。

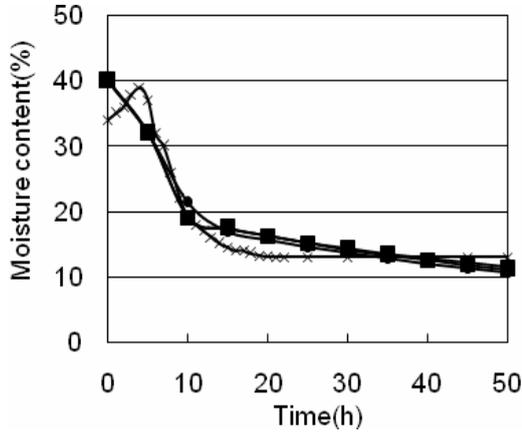


Fig. 6. Calculated moisture content during high temperature drying of Karamatsu.

Legend: ● : wet-bulb temperature; ■ : average temperature; ▲ : temperature of each section; × : experimental results.

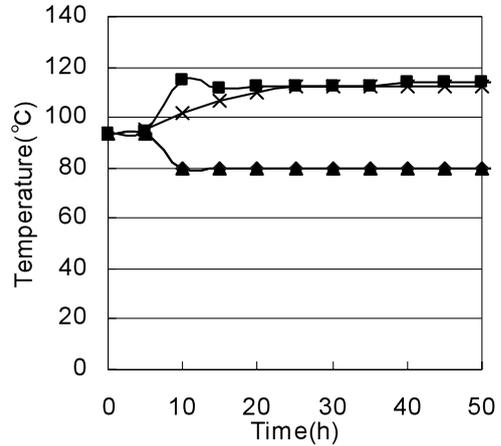


Fig. 7. Calculated center temperature in the wood during high temperature drying of Karamatsu.

Legend: Same as Fig. 6.

平均値を用いたシミュレーションが、最も実験結果と一致した。

4. 結 論

3次元の拡散方程式を差分法で解き、乾燥過程の構造材の含水率を計算した結果、以下のような結論を得た。

(1) 本プログラムに材温の推定を加えることにより、実験データに近い含水率および材温を計算することができた。

(2) 本研究の目的であった材内の温度をある程度推定できることが分かった。

(3) 実際の乾燥経過と合うようにプログラム上のパラメータを調整したその結果、材全体の温度の

文 献

- 1) 中尾哲也：木材学会誌 **48**(4), 241-248 (2002).
- 2) Bramhall, G.: *Wood Science* **12**(1), 14-21 (1979).
- 3) 吉田考久, 橋爪丈夫, 藤本登留：木材工業 **55**(8), 357-362 (2000).
- 4) 河崎弥生：“人工乾燥による針葉樹構造材の品質制御に関する研究”，鳥取大学博士論文, 2000.
- 5) 驚見博史：“木材の事典”，浅野猪久夫編，朝倉書店，東京，1982, p. 12.