木材中の水分拡散係数の含水率依存性[†]

古 山 安 之* 金 川 靖**

Dependence of Diffusion Coefficient on Moisture Content in Wood

by

Yasuyuki FURUYAMA* and Yasushi KANAGAWA**

The purpose of this paper was to measure the change of moisture diffusion coefficient with drying and then to investigate the relationship between moisture content and diffusion coefficient. In this research, discussions were limited to the isothermal moisture movement, and also one dimensional diffusion in the direction of the board thickness (tangential direction) of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). During conventional kiln-drying, the inner moisture distribution change of the board can be non-destructively detected with the medical X-ray CT Scanner. Therefore, it can be continuously measured at the same part of the same section. This method was developed in this study to obtain more accurate moisture content in wood from CT images. As the noise of images was reduced by employing alternative techniques, the standard error achieved finally was 0.8% MC in the hygroscopic range. The diffusion coefficients were calculated directly from the moisture distribution change, by an appropriating differential equation for non-steady diffusion, as the driving force is MC.

This research gave two interesting results. One is that, on the boundary layer between the lumber and the surrounding air, the moisture sorption did not reach to an equilibrium state. Its MC was higher than EMC, which is being used generally. The maximum difference between them in the first stage of drying, was 6% MC, and in the last stage, it became 3 ~ 5% MC at least.

Another result was that the diffusion coefficient appeared constant independent of MC. However, the computer simulation of moisture distribution showed that a more appropriate correlation seemed to be "the diffusion coefficient is dependent on MC, a cubic function with the maximum value of about 15% MC".

Key words : Diffusion coefficient, Non-destructively, The medical X-ray CT Scanner, Boundary layer, Dependent

1 緒 言

木材中の水分移動について従来より多くの研究がなされてきた。様々な駆動力を想定しての水分拡散係数と含水率の関係が検討されてきている。結果は様々であり、水分拡散係数は含水率の増加とともに増大するという結果¹⁾や、含水率にほとんど影響せず一定であるという結果²⁾などが見られる。

数多くの研究結果が存在するにもかかわらず依然有力な説が存在しない理由としては材内部の同一箇所の水分濃度や含水率分布の経時変化を把握し得なかったことが挙げられる。従来の方法、つまり材全体の乾燥経過から内部の含水率分布および水分拡散係数を推定する方法や、繊維方向に隣接する別個の試験材を同一と見なし、分割・全乾法を用いて測定する方法では結果の信頼性に乏しいと言えよう。なぜなら前者の場合、内部の含水率分布を把握していないのであくまで推測に過ぎず、また、後者の場合も繊維方向に隣接する材

の材質や初期含水率分布が同一であるとは考え難く、厳密性に欠け矛盾が生じ易いという欠点があるためである。

そこで、本研究では材内部の同一部分、同一箇所の乾燥経過を把握する手法として、医療用 X 線 CT スキャナ装置により得られる断層像から水分濃度分布を求める方法を用いる。この手法は分割・全乾燥とは異なり、材を破壊することなく内部の水分濃度分布を測定できるため、全乾燥過程を通じて同一断面の含水率分布を経時的に直接把握することが可能である。したがって、本研究ではこの連続的に測定した結果を基に、非定常状態の拡散方程式を適用して水分拡散係数を求めることとなり、従来のような水分拡散係数を試行錯誤的に定めて乾燥経過と整合する方法とは根本的に異なる。さらに、得られた水分拡散係数から逆に含水率分布の経時変化のシミュレーションを行って、実測によって求められた含水率分布の経時変化と比較するこ

† 原稿受理 昭和63年9月24日 Received Sept. 24, 1988

* 広島県立東部工業技術センター 福山市東深津町, Industrial Research Institute, Hiroshima Prefecture East, Higashifukatsu-cho, Fukuyama

** 正 会 員 名古屋大学工学部 名古屋市中区不老町, Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya

とができるのも大きな利点である。

しかしながら、本研究では含水率分布の経時変化を基に水分拡散係数を算出するため、含水率の測定精度がかなり要求される。服部³⁾、金川⁴⁾らの研究により、ある程度の精度をもって測定し得ることは示されているが、より精度の向上を図るため従来の研究結果を踏まえつつ、さらに発展させて測定を行うこととした。

2 含水率非破壊測定とその精度

医療用 X 線 CT スキャナ装置の本来の使用目的は人体の断面像を破壊することなく撮影する装置であり、あくまで診断のための定性的な測定装置である。したがって、撮影の対象物質として木材を想定してはいないし、水分濃度測定などの定量化を目的としてはいないため、使用に際してはいくつかの問題点がある。できるだけ精度の高い含水率測定が要求される本研究においては、それらの問題点にあらかじめ対処しておき、さらに可能な限り測定方法を発展させねばならない。対応すべき点として次の四点が挙げられる。

(1) 容積重と CT 値との直線関係において、試料の違いによりその傾き、切片が異なる³⁾ことが報告されている。また、撮像条件によっても変化する。したがって、本実験に用いる試験材を、しかも本研究において設定する条件で撮影した時の CT 値と密度の相関関係をあらかじめ調べておく必要がある。

(2) 木材のような低密度の物質を対象とした画像の均一性に問題があるとされる。過去の研究においては、ある CT 画像についてそれを 180° 回転させた倒立像を撮像し、両者を用いて画像むらを相殺する手法で好結果を得ている。本研究では正立像とそれを 90° ずつ回転した像の計四画像を用いて、さらに精度向上を図った。加えて、撮像の際に常に試験材を装置の中央の一定位置へ設置し、撮像位置による CT 値の乱れを防ぐことも必要となる。

(3) CT 値は木材実質による寄与分と木材中に含まれる水分の寄与分の両者を合わせたものであるため、試験材の比重分布が CT 値を大きく左右する。それゆえに、木材実質の密度分布を把握し、これを CT 値から差し引くことにより、水分による寄与分のみを取り出す必要がある。また、木材は繊維飽和点以下の状態では含水率の低下に伴い収縮するため、この影響による密度変化も考慮せねばならない。そのため、使用する試験材の収縮率も前もって測定せねばならない。

(4) CT 画像にはカッピング効果という現象がある。これを軽減させるため試料の周りに補償物質を装着し、試料の周縁部分の画像の乱れを軽減させることが必要である。また、本実験は人体頭部を撮影するための条件設定を行う。(この条件設定は後述のフィルター関数・FC2にあたる。)このため、撮影対象物は人体頭

部に近い密度分布ほど正確な画像データが得られる。それを考慮すると、試料は円形で外周が高密度(頭蓋骨にあたる)、内部を低密度(脳組織にあたる)とした状態が望ましい。そこで本研究では試料の周りに密度の比較的高い、飽水材と同程度の CT 値を持つシリコンゴムを補償物質として用いることとした。

以上の点を考慮して、CT 値と試験材の密度との相関性を評価する。用いる試験材はダグラスファー(*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.) 材であり、乾燥経過測定実験に用いた試験材と繊維方向に隣接するものである。撮影に使用した測定装置は名古屋大学附属病院放射線科に設置されている、頭頸部脊椎撮影用の東芝製 TCT20A 型で、第三世代の X 線 CT スキャナ装置に属する Rotate/Rotate (R-R) 方式の装置である。撮影条件を以下に示す。

管電圧	120 kV
管電流	230 mA
スライス幅	2 mm
位置分解能	0.75 mm
フィルター関数	FC2
Scan Speed	9.0 秒
撮影範囲	直径 24 cm

撮影後、その撮影した位置を 1 cm 角のブロックに分割し、個々の試験片についてその密度および水分濃度を測定する。測定には化学天秤を用い、体積の測定には水銀法を用いる。含水率範囲 2 ~ 32 %, 密度 0.50 ~ 0.68 にある 700 個の試験片について調べた結果を Fig. 1 に示す。また、Fig. 2 に材の寄与分を差し引いた時の CT 値と水分濃度との関係を示す。

この結果によると、相関係数は 0.99 となった。そして CT 値の標準誤差は 4.42 であり、これをこの試験材における含水率に換算すると、約 0.8 % に相当する。この結果より本実験における含水率の測定誤差としては 1 % 程度見込む必要があると考えられる。

Note: averaged values of 4 directional images.

Fig. 1. The relationship between density and CT number for Douglas-fir.

Note: averaged values of 4 directional images.

Fig. 2. The relationship between water concentration and CT number for Douglas-fir.

3 理 論

水分移動の駆動力として様々なものが提示されているが, 本研究では含水率を駆動力として水分移動を表現する。水分拡散係数が変化する要因としては特に材質, 温度, 含水率の三者が挙げられる。本実験では含水率の変化に伴い, 水分拡散係数がどの様に変化するかを調べるのが目的であるため, 前二者による影響を排除する必要がある。そこで本研究では試験材としては均一な材質を持つダグラスファー材を用い, 接線方向の一次元拡散を検討する。また, 乾燥室内の温度を一定として乾燥させることによって材温を一定として取り扱う。

乾燥過程などの非定常状態での水分拡散は Fick の第2法則を用いて,

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_u \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (1)$$

C: 水分濃度 (g/cm³)

t: 時間 (hour)

D_u : 含水率を駆動力とした水分拡散係数

u: 含水率 (%)

x: 移動方向の距離 (cm)

と表される。

前述のように, 本研究では材内部の水分濃度や含水率分布の経時変化が把握できるため, 上式の水分濃度および含水率が既知数となり, 未知数は水分拡散係数のみである。この式を差分近似し, 含水率分布の経時変化から未知数である水分拡散係数を直接算出する。

4 試験材および実験方法

本研究で使用されるダグラスファー材は正まさ目板材であり, 寸法は板厚(接線方向)を 6 cm, 幅(半径方向)を 18 cm, 繊維方向の長さを 30 cm とした。また, この材の気乾比重は約 0.55, 平均年輪幅は約 1.7 mm である。木口および板目面をシリコン系の接着剤(信越科学(株)製造, 一液型 RTV ゴム KE45T)でコーティングし, 柃目面以外からの乾燥を防ぐよう

Notes: Drying method: Conventional kiln-drying.

sample: 6 cm board of Douglas-fir.

DBT: Dry bulb temperature.

WBT: Wet bulb temperature.

Fig. 3. Drying curve and drying condition.

に処置した。

乾燥機は 1F 型熱気式乾燥機を使用し, 全過程を通して, 乾球温度は 60°C 一定とする。乾湿球温度差は初期 4°C, 乾燥が進行するに従い順次湿球を下げ, 終期には温度差を 30°C とする。乾燥過程の一例を Fig. 3 に示す。乾燥する前に試料の中央部に測定位置をあらかじめ定めておき, 乾燥前, 乾燥後を通じ定期的に医療用 X 線 CT スキャナ装置を用いて, 所定の位置の断層像を撮影する。このときの装置および撮影条件は前述と同様である。

乾燥終了後, 試料の測定部分を取り出し, 断面中央部を厚さ方向に十等分して, 全乾の状態での密度分布を求め, これと実測 CT 値から乾燥過程における含水率分布の経時変化を得る。結果の一例を Fig. 4 に示す。

乾燥初期においては材内部の温度は低い状態にあるため等温状態での水分移動として扱うことはできない。

Notes: 0=center of the specimen.

initial ave. M.C: 37.4 %

end ave. M.C: 10.5 %

Fig. 4. Moisture distribution change in direction of lumber thickness in drying.

この部分の温度がほぼ一定と見なし得るのは乾燥を開始してから約6時間後で、これ以降に式(1)を適用して、水分拡散係数を算出する。なお、非定常状態の拡散方程式の境界条件として、表面含水率は平衡含水率に達していないとした報告⁵⁾はあるが、材表面の含水率を実測することは極めて困難であるため、まず木材の表面層は外気との平衡含水率にあると仮定する。

5 結果および考察

得られた水分拡散係数と含水率の関係を Fig. 5 に示す。図中において大部分を占める○の点とは別に一部の点が異なる値となった。厚さ方向(接線方向)の中央部分における水分拡散係数の●、および表層部分における最外層への水分拡散係数の△は、○に比べわずかに低い。前述のように本研究では均質と見なし得る材料を取り扱っているため、位置による差があるとは考えにくく、測定誤差が原因と考えられる。▲は最外層から境界層への水分拡散係数で、これらは異常に低い値となっている。この差は、若干は存在するであろう材質の差はもちろん、測定誤差も大きく越えたものである。これは境界層を外気との平衡状態にあるとした条件設定に根本的な誤りがあると考えられる。要するに、境界層、すなわち表面は平衡含水率になっていないと見なすのが妥当であろう。Fig. 4 を見ると最外層から境界層にかけてかなり急激に含水率が低下している。この図を見ても不自然なことは明らかであり、水分拡散係数を算出しても異常な値となることはむしろ当然といえる。

そこで、これらの点が測定点の大部分を占める○の点と一致するような含水率勾配を求め、その逆算値を基に誤差を含んでいると考えられる含水率を見積り直

Fig. 5. Correlation between Diffusion coefficient and Moisture content.

Fig. 6. Difference between equilibrium moisture content assuming in solution of the diffusion equation and calculated one in boundary layer.

してみる。●の場合、中心の含水率を最大0.5%程度低く、△の場合は、最外層の含水率を最大1%程度高くせねばならないと計算された。これは測定誤差の範囲内にある。境界層の含水率については大きく見積り直す必要があり、それを Fig. 6 に示す。境界層の含水率は測定が困難なため、図の下線のように設定していたが、水分拡散係数から逆算すると上の線のように見積り直す必要がある。その差は初期において6%程度、後期においても3~5%程度高い値にあるという結果となった。この結果を基にもう一度含水率分布の経時変化を求め、Fig. 7 に示す。そしてこれを基に再度水分拡散係数を算出すると Fig. 8 になり、これが気乾比重0.55のダグラスファー材の温度60°Cにおける接線方向の水分拡散係数である。

つぎに、得られたこの結果と従来の研究結果とを比較する。含水率を駆動力とした時の水分拡散係数と含水率の関係では満久が含水率によらず一定である²⁾とした。この結果を Fig. 8 に単位を変換して引用する。さ

Fig. 7. Corrected moisture distribution change in direction of lumber thickness in drying.

Fig. 8. Corrected correlation between diffusion coefficient and moisture content.

らに、小倉が定常状態で測定した結果も併せて示す。他の研究結果として含水率の増加に伴い水分拡散係数も増加するとした例では、Rosen の報告がある¹⁾。これによると水分拡散係数は含水率の指数関数で表され、含水率の増加と共に急激に増加することになる。

それらに比し本研究結果を見ると、低含水率では小倉と同様に含水率の減少に伴い、水分拡散係数も減少している。しかし、減少する含水率は小倉の結果よりやや高い値である。それに対し、含水率 10 % 以上における水分拡散係数は Rosen の結果とは明らかに異なり、小倉や満久の結果と同様と見なすことが可能である。

しかし、詳細に見たとき含水率によらず単純に一定とするより、含水率に伴って変化をし、含水率 15 % 付近に極値を持つ三次元曲線と見なすことも可能である。

本来、水分拡散係数も物質定数であることを考えると、一定値である方が自然という考えもあるが、木材内部の水分の場合、その存在状態はかなり複雑なため、

Fig. 9. Simulated moisture distribution change in direction of lumber thickness in drying.

Fig. 10. Relationships between measured and simulated moisture content.

必ずしも一定値とは言い切れない。そこで、この両者の考えのうち、どちらの考えがより正しいかを含水率分布の経時変化のシミュレーションを行うことにより、判断してみる。

まず、水分拡散係数が含水率に関わらず一定であるとしてシミュレーションを行った結果について Fig. 9, Fig. 10 に示す。前者は含水率分布の経時変化をシミュレーションした結果であり、後者は実測の含水率分布の経時変化の各位置、各測定時の含水率を横軸にとり、それに対応するシミュレーション値を縦軸にとったもので図の中央にある 45° の線上付近に離散点が近いほど、シミュレーションの結果が良く、より正しく乾燥経過を表現しているといえる。Fig. 9 を見る限り、全体の乾燥経過を表現しているとみても差し支えない。Tuttle が唱えたように、一定の水分拡散係数を用いて含水率 8 ~ 52 % の範囲の水分移動現象が表せる²⁾という説も肯定できる。しかし、Fig. 10 を見ると、乾燥過程の前半で早く乾燥が進みすぎ、逆に後半において遅れが生じている。これは水分拡散係数

Fig. 11. Simulated moisture distribution change in direction of lumber thickness in drying.

Note: Diffusion coefficient is dependent on Moisture content.

Fig. 12. Relationships between measured and simulated moisture content.

を一定としているため高含水率域では水分拡散係数を過大評価し、低含水率域では水分拡散係数を過小評価しているからと考えられる。

同様に、水分拡散係数と含水率の関係が三次元曲線であると見なしてシミュレーションを行った結果について Fig. 11, Fig. 12 に示す。このシミュレーション結果は、全乾燥過程を通して実測値とシミュレーション値がよく一致しており、先ほどのシミュレーション結果と比較してより良い結果が得られている。すなわち、この結果から明かなように水分拡散係数は含水率にかかわらず一定としても乾燥経過を表現できないわけではないが、正しく表現するためには含水率 15 % 付近に極値をもつ逆 S 字型をした三次元曲線関係とすべきである。

Fig. 13 は満久がヒノキ材を用いて計測した結果を引用したものである。この図を見ると、含水率 15 % 付近に最大値が存在している傾向が伺える。しかし、本研究のように試料中の同一部分の含水率分布の経時変化を連続測定しているわけでもなく、測定点の数も少ないため、それを断定し得なかったと考えられる。

6 結 論

(1) 医療用 X 線 CT スキャナ装置を用いて材内部の水分濃度や含水率の分布を非破壊測定する手法を再度検討し直し、過去の研究を発展させることにより、精度を向上させることができた。測定精度は CT 値の標準誤差が 4.42 で、これは気乾比重 0.55 のダグラスファー材の含水率に換算して 0.8 % に相当する。

(2) 水分拡散係数を算出する際、材表面に境界層を設け、そこが試料外周と平衡状態にあるとする条件設定は明らかに誤りである。本実験条件においては、こ

Note: reported by Maku²⁾.

Fig. 13. Correlation between Diffusion coefficient and Moisture content.

の表面層の含水率は乾燥初期で最大 6 % 程度、乾燥後期でも 3 ~ 5 % 程度平衡含水率より高いと考えられる。

(3) 水分拡散係数と含水率の関係は Rosen の示した結果、すなわち含水率の増加に伴い増大するという結果とは明らかに異なった。本研究結果は一見して含水率とは無関係に見え、満久や Tuttle の説が正しく感じられる。しかし、実際の乾燥経過と厳密に一致させるためには含水率に関わらず一定とみなすよりは、含水率 15 % 付近に極値を持つ逆 S 字型の三次元曲線関係にあるとすべきである。すなわち、木材中での水分の存在状態と密接な関係があると推察され、今後の研究が必要であろう。

本研究を進めるにあたり、医療用 X 線 CT スキャナ装置の使用に際して、御協力下さった名古屋大学付属病院放射線科の松浦浩前技師長、山口宏技師長に、そして、撮影に直接ご協力下さった加藤茂生主任技師を始めとする技師の皆様方に心より感謝致します。

また、本研究を遂行するに当たり、日常的に御助言、御援助を承った名古屋大学農学部木材物理学研究室の皆様方に心より感謝致します。

(昭和 63 年 7 月 19 日 第 38 回木材学会大会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 例えば, H. N. Rosen, Wood Science, 8 (3), 174-187 (1976).
- 2) 例えば, 満久崇麿, “木材の乾燥”, p. 51 (1962) 森北出版.
- 3) 服部芳明, 金川 靖, 木材学会誌, 31 (12), 974-982 (1985).
- 4) 金川 靖, 服部芳明, 木材学会誌, 31 (12), 983-989 (1985).
- 5) 例えば, 小倉武夫, 林試研報, 35 (1955).
- 6) 小倉武夫, 林試研報, 42 (1949).