

木材の乾燥過程における断面内の水分移動に関する実験的研究

高橋 七海

1. はじめに

木材の膨潤・収縮は、結合水の吸着・脱着することに伴う体積変化である。木材中の水分は、大気との平衡状態より伐採時の方が一般に多く、故に長期的な寸法安定性が望まれる建築物への利用を目的とすれば、乾燥工程が不可欠と考えられている。

木材の乾燥は、天然乾燥と人工乾燥に大別され、短期間で乾燥を終える人工乾燥が現在の主流と言える。人工乾燥は、40 年程前から乾燥条件が検討され始め、木材固有の色味や香りの損失、ならびに収縮に伴う割れの抑制を目標に、試行錯誤的に改良が続けられてきた。近年では、乾燥初期の湿度を高くして表面の乾燥割れを軽減する、高温セットと呼ばれる方法が多く採用されている。一方、この方法は構造性能に影響を及ぼし得る木材内部に乾燥割れを発生させることが問題視されており、それを抑制する上でも、未だ体系化されていない乾燥中の膨潤・収縮現象、ひいては木材内の水分移動の状況を明らかにする必要がある。

以上を背景に、本研究は国内の代表的な樹種であるスギを対象に、乾燥過程における水分の移動を実験的に調べたものである。以降では、実験におけるいくつかの条件を整理した後、実施した実験とその結果を示し、得られた知見をまとめる。

2. 評価指標と木材の乾燥条件の整理

2.1 人工乾燥と内部割れ発生メカニズム

表 1 乾燥工程と乾燥条件

	時間 (h)	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)
蒸煮	12	0	100
高温セット	24	120	92
	1	110	82
	1	100	72
乾燥	220	80	60
冷却	24	0	62

現在主流となっている人工乾燥では、表 1 のように高温セット処理により木材表面の細胞を軟化させることで、水分の離脱に伴う細胞壁の収縮への追従を可能とし、乾燥による表面割れを抑制している¹⁾。一方、木材内部では、熱伝導が不十分で細胞の軟化が生じていない場合に、断面内の水分移動に伴う細胞壁の収縮に起因して内部割れが生じると考えられている²⁾。内部割れの発生機構を明らかにする上で、高温セット処

理における細胞の軟化がどの程度進行しているかに加え、乾燥過程における断面内の水分移動がどのように進展しているかを把握することが必要であると言える。

この内、本研究では水分移動に着目し、乾燥中の環境を模した恒温恒湿環境下における木材断面内の水分分布の推移を追う実験を実施した。また、急速な乾燥条件との比較として、自然環境下での乾燥における水分移動も調べた。

2.2 含水率の定義と算出方法

本研究では、主に木材中の水分量を含水率で評価する。含水率 u は、次式で評価される³⁾。

$$u = \frac{W - W_0}{W_0} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

式 (1) で W : 含水率 u % 時の木材の重量, W_0 : 全乾状態における木材の重量で、木材実質と水分の重量比を百分率で表示したものである。

木材の含水率は JIS Z 2101 において規定されている全乾法により求められる²⁾。全乾法では、まず初めに試験体の質量を測定し、 103 ± 2 °C に保った乾燥機に試験体を入れ、全乾状態になるまで乾燥する。6 時間の間隔を置いた測定において質量変化が 0.5 % 以下に収まった時点を実験を終了とし、その際の質量を測定する。得られた乾燥前後の質量を式 (1) に代入することで含水率を算出する。

2.3 平衡含水率

木材を一定の温湿度環境で長時間放置して平衡状態に達した際の含水率を平衡含水率と呼び、任意の温湿度環境下での乾燥状態の収束点を知ることができる。Hailwood and Horrobin の吸着理論に基づき平衡含水率は (2) 式で求められる⁴⁾。

$$u = \frac{1800}{M} \left(\frac{abh}{1+abh} + \frac{ah}{1-ah} \right) \quad (2)$$

ここで、 u : 平衡含水率 (%), h : 湿度 (相対湿度/100) である。式 (2) 中の係数 a, b, h はそれぞれ華氏温度 T (°F) の関数として以下の式のように表す。

$$\begin{aligned} a &= 0.6740 + 0.001053 T + 0.000001714 T^2 \\ b &= 3.730 + 0.03642 T + 0.0002547 T^2 \\ M &= 216.9 + 0.01961 T + 0.005720 T^2 \end{aligned} \quad (3)$$

また、気象条件から推定される木材の平衡含水率を気候値平衡含水率という。この値は天然乾燥による平

平衡含水率値の目安となり、日本国内においては 12 ~ 19 % の範囲であるとされている。

3. 木材断面内の水分移動を調べる実験

3.1 実験概要と試験体

全乾法にて断面内の含水率分布を測定する場合、乾燥の進展に伴う同一試験体内の含水率分布の推移を追うのは困難である。そこで本研究では、材長方向に隣り合う 4 つの試験体を同一試験体とみなし、乾燥期間に差をつけて断面内の含水率分布を求め、それらの試験体間での違いを見ることで、乾燥過程における水分移動を追う。今回行った実験の流れを図 1 に示す。

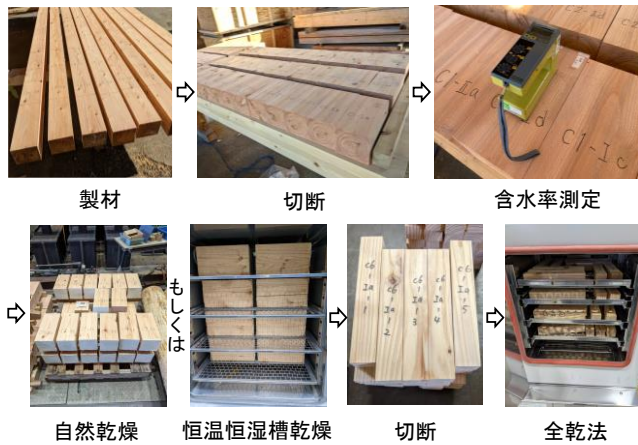


図 1 実験全体の流れ

本研究で用いた丸太は熊本県北部のスギ植林地にて伐採された長さ 4 m の直材 10 本で、140 mm 角に粗挽きした後、図 2 に示すように材長方向に 12 分割し、断面 140 mm 角、長さ 290 mm の試験体とした。同じく図 2 に示す 4 箇所を含水率を計測し、その平均値を該当試験体の含水率として評価した。この時、木材の木口面からの乾燥を防ぐ目的で、シーリング剤を塗布した。その後、2 種類の乾燥条件に分けて所定の期間乾燥させた後、図 3 に示すように断面 25 mm 角、長さ 150 mm の試験体に断面を 25 分割し、全乾法によりそれぞれ含水率を求めた。

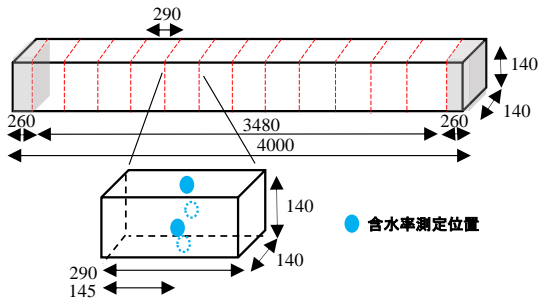


図 2 木材の 12 分割切断と含水率測定位置

3.2 乾燥条件とスケジュール

今回設けた 2 種類の乾燥条件は、人工乾燥の環境を模した 80 °C、40 % の恒温恒湿環境と、天然乾燥

の環境を模した実験棟内の自然環境である。以降では前者の試験体を恒温恒湿槽試験体、後者を自然乾燥試験体と呼ぶ。それぞれの環境における平衡含水率を 2.3 節の (2)(3) 式を用いて算出すると、恒温恒湿環境では 6.53 %、自然環境では 7.6 ~ 16.8 % であった。

測定の対象とした試験体数は、使用した恒温恒湿槽の容量の点等から、恒温恒湿槽試験体で 4 m 製材 2 本分、自然乾燥試験体で 3 本分、シーリング剤の効果を検証するモニター材として 1 本分の計 6 本で、得られた 10 本の試験体より、目視での木材状態や重量、含水率のばらつき等を指標として選別した。

図 4 に示す試験体番号 a の試験体を乾燥前の基準とし、b は 1 週間、c は 2 週間、d は 3 週間、それぞれの環境下で乾燥を行った。しかし、3 週目の途中で恒温恒湿槽が故障したことにより、d の恒温恒湿槽試験体は、2 週間と 3 日間は恒温恒湿槽で、その後の 4 日間は自然環境で乾燥させた。

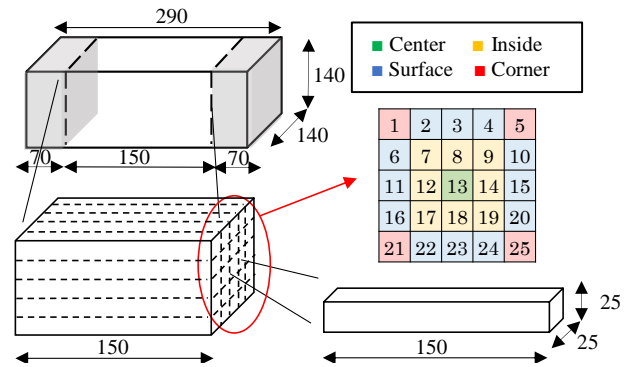


図 3 試験体の寸法と断面番号

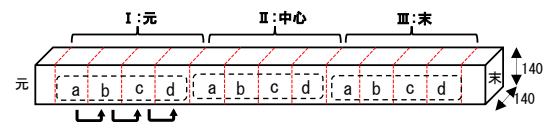


図 4 試験体番号

4. 実験の妥当性の検証

4.1 シーリング剤の効果

木口面のシーリング剤の有無のみが異なる 2 種類の試験体について、乾燥に伴う断面内の含水率分布の推移を図 5 に示す。数字は当該箇所の含水率を示し、色の濃淡は断面内での含水率の高低を表している。

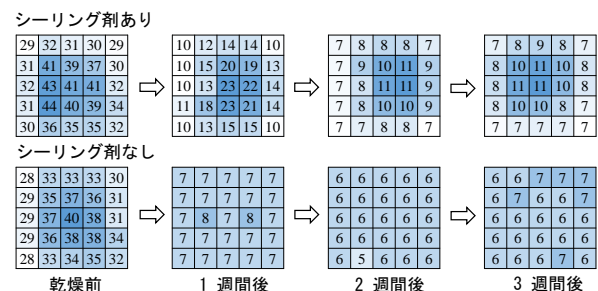


図 5 シーリング剤と含水率の変化の比較 (%)

シーリング剤を塗布していない試験体は乾燥により断面内で均等な含水率分布となっているのに対し、シーリング材を塗布した試験体は表面に近いほど含水率が低くなっている。シーリング剤の塗布により、木口面からの乾燥を除外し、年輪の半径方向に対する水分移動を追えているといえる。

4.2 材長方向での含水率分布のばらつき

材長方向に隣り合う 4 試験体を同一の試験体とみなすためには、試験体製作時に 4 試験体間での含水率差が微小であることが必要条件となる。製材時の含水率測定に用いた含水率計は測定対象物の全乾比重による影響を受けるため、全乾法より得られた全乾比重を用いて測定値を補正し、材長方向のばらつきを評価した。材長方向の含水率のばらつきに関する変動係数は最大でも 0.059 と、1 以下であったため、材長方向の不均質性は無視できるものとし以降の分析を進める。

4.3 節の影響について

節は木材内の不均質性の一つであり、隣り合う試験体を同一試験体とみなす際に影響を与え得るため、節の有無によって生じる、含水率、全乾重量、水分量の差異を評価する。25 mm 角の試験体について、目視による節の有無の判断を行い、前述した各評価項目における、節のない試験体の平均値に対する節のある試験体の平均値の比率を部位毎に算出した結果を表 2 に示す。試験体数が少ない中心部の評価は行わなかった。

表 2 節の影響 有無による各項目の比率

比率	恒温恒湿槽試験体			自然乾燥試験体		
	含水率	全乾重量	水分量	含水率	全乾重量	水分量
角	1.02	1.07	1.11	1.04	1.04	1.09
表面	1.01	1.06	1.07	1.02	1.05	1.07
内側	1.01	1.04	1.03	1.00	1.04	1.06

表 2 より、節を内包することで全乾重量及び水分量は大きくなるが、含水率は変わらないことが読み取れる。節を含むことで全乾重量は大きくなるが、それと比例し木材組織に含み得る水分量も多くなるため、含水率には差異が生じなかったと考えられる。本研究において含水率を評価指標とすることで、節の影響を除外し、断面内の水分移動を分析できるといえる。

5. 断面内の含水率変化の測定結果

5.1 断面内での含水率変化

前節までの検討より、全乾法で得た含水率値の補正は行わず、乾燥に伴う断面内の水分移動について分析を進める。図 6 に恒温恒湿槽試験体と自然乾燥試験体それぞれ 1 組の断面内の含水率分布の推移を示す。恒温恒湿槽試験体について、3 週間後の表面の含水率

が、恒温恒湿槽環境での平衡含水率 6.53 %に近い値となっているため、十分に乾燥されていたと考えられる。一方で自然乾燥試験体は 3 週間後も平衡含水率には達していないため、未だ乾燥途中であると考えられる。恒温恒湿槽試験体、自然乾燥試験体ともに、他の試験体でも同様の結果がみられた。

含水率の減少量に着目すると、自然乾燥試験体は断面全体で均等に含水率が減少しているが、恒温恒湿槽試験体は乾燥初期には表面で、その後には内側で含水率が大きく減少する様子が窺える。以降ではこの点についてより詳しく分析する。

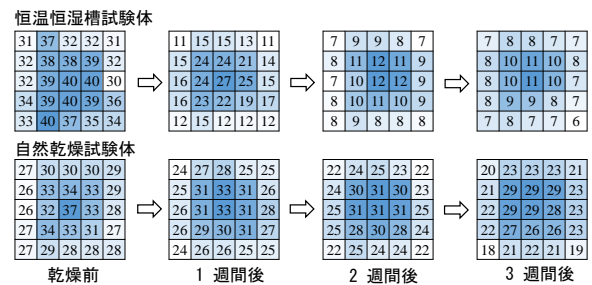
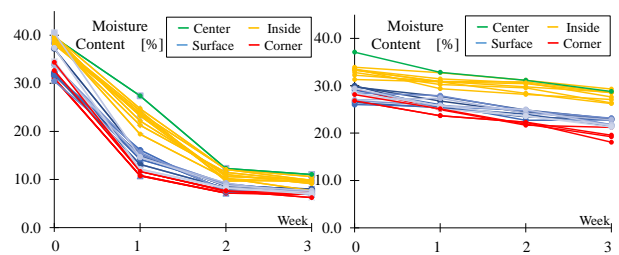


図 6 含水率の断面分布と時間変化

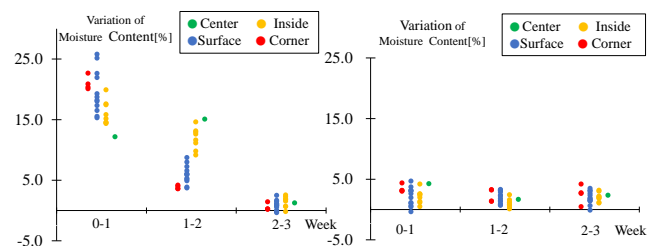
5.2 断面の部位による含水率変化の違い

断面を 25 分割した試験体を図 3 に示すようにに中心、内側、表面、角の 4 つに分類し、木材断面の部位毎の含水率推移の差異について分析する。恒温恒湿槽試験体、自然乾燥試験体それぞれ 1 組ずつの含水率の推移を図 7 に、同試験体の含水率の変化量を図 8 にまとめて示す。



(a) 恒温恒湿槽試験体 (b) 自然乾燥試験体

図 7 含水率の推移



(a) 恒温恒湿槽試験体 (b) 自然乾燥試験体

図 8 含水率の変化量

図 8 (a) と図 9 (a) より、恒温恒湿槽試験体は木材表面の空気に触れる部分が多いほど 0-1 週目の傾き、つまり含水率の減少量が大きく、1-2 週目は中心

に近い試験体ほど減少量が大きいことが確認される。

一方、図 7 (b) と図 8 (b) より、自然乾燥試験体の含水率は、いずれの乾燥期間でも変化量が 5 %以内と小さく、部位間での含水率変化に違いは見られないため、断面内で均等に含水率が減少していると言える。

これらの傾向は恒温恒湿槽試験体と自然乾燥試験体の全試験体において確認されたため、強制的に乾燥を進める場合、まず木材表面から含水率が減少し、それに追従するように内部の含水率が減少するような関係があると考えられる。

6. 乾燥割れに関する考察

6.1 水分勾配と乾燥割れに関する考察

実験結果を踏まえ、乾燥に伴う断面内の水分移動が乾燥割れの発生に与える影響について考察する。

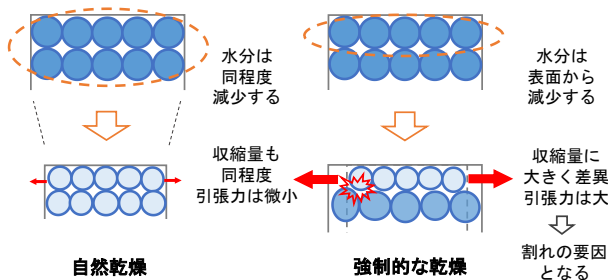


図 9 水分勾配と乾燥割れ

図 9 に示すように強制的に乾燥を行う場合、自然乾燥で断面内の水分が均等に抜けていく場合と異なり、断面内の含水率の変化に部位間で時間差が生じるため、ある時点での収縮量が細胞の部位により異なることとなる。よって隣り合う細胞での収縮量の差により、細胞間に引張力が生じ、乾燥割れの発生要因となる。

人工乾燥では、木材の蒸煮、高温セット処理を行うことで、細胞を軟化させ、表面での割れを防ぐ。しかし、軟化する領域には限りがあるため、軟化していない細胞では割れが発生し、内部割れとなる。細胞の軟化には温度が影響するため、内部割れの発生に関するさらなる議論には、今回得た水分移動の知見に加え、木材断面内の温度勾配に関する知見も必要である。

一方で自然乾燥を行う時、均等に水分が減少するにも関わらず、表面に割れが発生する要因として、図 10、図 11 のような 2 つのメカニズムが推察できる。

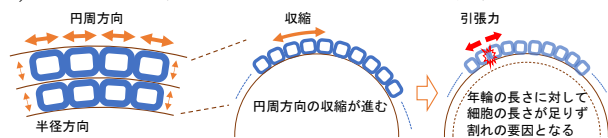


図 10 表面割れのメカニズム 1

水分が半径方向に抜けていくことから、その通り道である半径方向の収縮量が円周方向より小さいとすると、収縮により、一層の細胞が形成できる年輪の周長

が、その半径に対する年輪の長さより小さくなる状況が生まれ、引張力に対して細胞が限界に達した時、割れの発生要因となる。表面の細胞ほど、円周方向の収縮量が大きいと、表面に割れが発生しやすくなる。

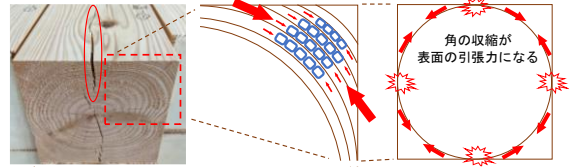


図 11 表面割れのメカニズム 2

また、断面の角の収縮による引張力が表面割れの要因となることが考えられる。丸太を角材に製材すると、角の細胞は年輪が途切れているため、収縮が進みやすい。そのため、角部分の細胞と半径方向に隣り合う細胞には、角の細胞の収縮が引張力として働き、表面割れの発生要因となる。

6.2 節と内部割れに関する考察

木材内部の不均質性を代表する節の存在が内部割れの発生へ与える影響について考察する。

4.3 節より、節は周囲の細胞と比較し、含水率に大差はないが、全乾重量及び乾燥により失う水分量は大きいことが分かった。節が含んでいる絶対的な水分量は周囲の細胞より多いため、乾燥に伴う細胞の収縮量も大きくなる。全乾重量の大きい節自体は細胞が多く密度が高いため、収縮に耐えるが、節周辺の細胞はその収縮に追従できないため節との境界に引張力が生じる。この引張力が起因となり、節周辺で内部割れが発生する可能性が考えられる。

7. まとめ

本研究では、木材の乾燥割れの発生要因の一つである、乾燥過程における断面内の含水率分布の推移を追う実験を行った。自然乾燥の含水率は均等に減少するが、強制的な乾燥を行うと、まず木材表面から含水率が減少し、それに追従するように内部の含水率が減少する関係があることが示された。また、節の存在は含水率には影響がないことが明らかになった。

得られた知見を基に乾燥割れが発生するメカニズムを考察したが、より深い理解を得るためには乾燥過程における断面内の温度勾配の知見が必要であり、水分勾配と合わせた分析が今後の課題である。

参考文献

- 1) 石川県林業試験場 石川ウッドセンター. 安心・安全乾燥材の生産・利用マニュアル. 前田印刷株式会社, pp. 88, 2012
- 2) 神代圭輔, 大野未奈, 田中季恵, 三好由幸, 古田祐三. 乾燥温度および乾燥速度が木材乾燥中におけるマイクロクラックの発生挙動に及ぼす影響, 日本材料学会, 69(4), pp. 323-328, 2020
- 3) JIS Z 2101 : 2009 木材の試験方法, 4. 含水率の測定
- 4) 斎藤周逸, 信田聡 : 日本の気候値平衡含水率, 木材学会誌, Vol. 62, No. 5, p. 182-189, 2016