

人工乾燥による木材の内部割れの実態調査と評価

今津 由貴

1. はじめに

木材を建築物に利用する上で、竣工後の寸法安定性の確保等の観点から乾燥工程は不可欠である。乾燥方法は、天然乾燥と人工乾燥に大別され、コスト面・納期の柔軟さから現代の主流は人工乾燥と言えるが、短期間に乾燥を進めるデメリットもあり、調色等の問題の他、構造性能と関係し得る乾燥割れが指摘されている。本研究は、これら乾燥割れの実態を明らかにすることを目的に、国内の主要な樹種であるスギ・ヒノキを対象に、CT スキャンにより乾燥割れの実態を調べると共に、木材物性との因果関係を分析したものである。

2. 乾燥割れの発生メカニズム

人工乾燥に関する技術は、現在でも確立されていないが、その主流は高温セット乾燥と呼ばれる方法で、乾燥割れが木材の表面でなく内部に生じる特徴を持つ。これを一般には内部割れと呼び、農学分野ではそれを抑制する方法が検討されているが、それらが構造性能に与える影響は未だ明らかではなく、本研究ではこの内部割れを検討の対象とする。

内部割れは、乾燥収縮が最も顕著な年輪接線方向に生じる現象で、断面内の収縮率の差異により生じる接線方向の引張応力を主な要因とする。そのため、乾燥収縮に影響を与える木材密度や含水率が、すべての木材で等しければ、割れが生じない特定の条件が定められるが、天然材料である木材には一定以上のバラツキがあることから、完全な抑制が難しいとされている。

各木材の内部割れのメカニズムを理解するため、先行研究の成果と共に、その詳細を整理する。まず図 1 に発生メカニズムの概要をまとめる。メカニズムを理解する上で、先行研究を調査した結果、内部割れと直接関連する断面全体の変化に関する検討は乏しい反面、微小な木片に対する詳細な検討に有意義な知見が認められた。具体的には、0.1 mm（繊維方向）× 3.7 mm（半径方向）× 15 mm（接線方向）の試験片を対象とした研究で、乾燥状態の微視的に観察した成果で、乾燥初期にマイクロクラックと呼ばれる 1 mm 以下の孔が細胞壁に多数発生することを示している²⁾。

このマイクロクラックは、乾燥初期に発生するもので、主に温度条件によって割れが進行する孔と進行しない孔に分かれる。割れが進行しない場合は高温、急速な乾燥条件で、水分の気化による乾燥収縮よりもリグニンの軟化が支配的となる。リグニンの軟化温度は、含水率が 20 % 以上で 80 °C、0 % で 150 °C 程度であり³⁾、これと概ね含水率 30 % 程度と知られる繊維飽和点以下の含水率で生じる細胞壁の乾燥収縮のバランスにより、割れの進行が決定すると理解される。

以上の理解を踏まえ、改めて図 1 をみると、まず蒸煮により表面の水分量を高めた上で高温状態とする。この状態でもマイクロクラックは発生するが、蒸煮によりリグニンの軟化が優位となり、収縮により木材表面は内部の収縮前の細胞から引張力を受けるが、割れには進展せず、そのまま収縮を終え固定される。

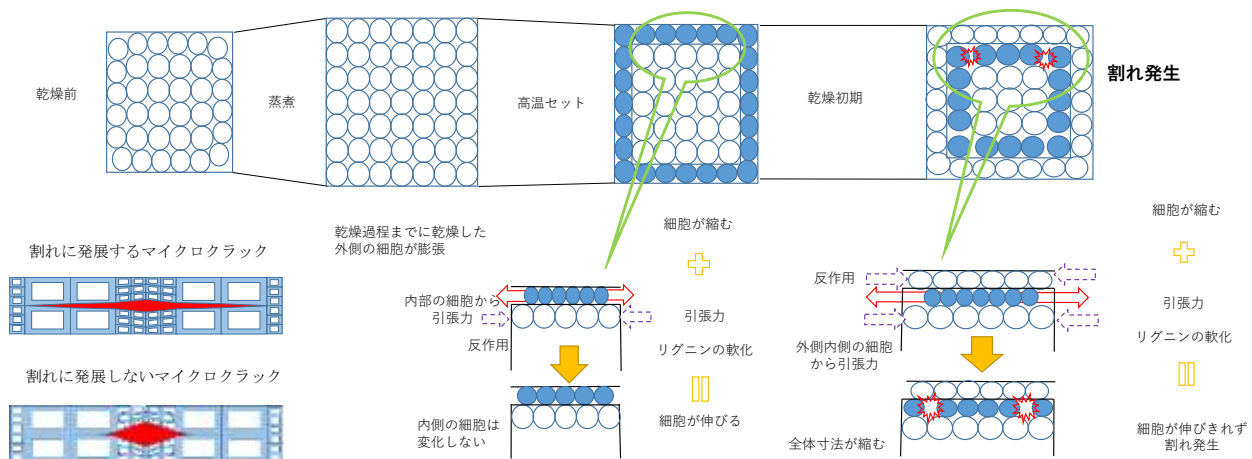


図 1 内部割れの発生メカニズム

ここまでは、微小な試験片と概ね同様の変化を示すが、以降では断面内の水分勾配と温度勾配が生じることで、異なる様相を呈する。具体的には、同図に示すように、表面より内部にある細胞の収縮において、表面とそれよりさらに内部の細胞の両者から引張力を受ける状況となるため、割れの要因となる引張力が大きくなる。また、表面からの熱伝導が不十分であればリグニンの軟化が生じないため、マイクロクラックは進展し、結果として内部割れとなる。これらが内部割れの発生メカニズムと考えられ、以降ではこの基本原理を基に分析を進める。

3. 内部割れの評価実験

3.1 実験概要と試験体の計測項目

これまでの整理から、木材の内部割れには断面内の水分と温度の勾配、さらには木材自体の力学的性質が強く影響することが予想される。これらの点を踏まえ、本研究で実施した内部割れの評価実験では、すべての木材に対して等しい乾燥環境と乾燥時間を定め、図 2 に示すように各工程において、木材物性を計測しながら実験を進める計画とした。



図 2 実験の全体計画

試験体は、断面 135 mm 角の製材で、スギ・ヒノキの 2 樹種をそれぞれ 30 体、合計 60 体を用意した。すべて長さ約 4000 mm で、伐採から約 3 週間ほど経過した木材である。用意した木材に対し、図 3 に概要を示すように、乾燥前後の各種寸法と含水率を計測した。また、重量計測と縦振動法に基づくヤング率の推定も併せて実施した。

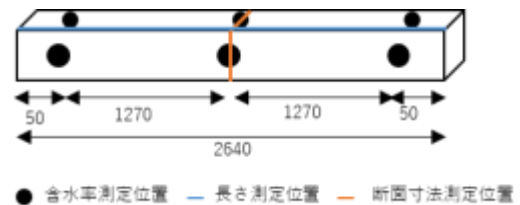


図 3 試験体毎の計測項目

ここで、含水率は高周波容量式の木材水分計を用い、表面から 20 mm 程度の位置の含水率を測定すると言われ、内部割れとの対応が期待される。なお、本研究では同図に示す 6 箇所計測した含水率の平均値を当該試験体の含水率として評価した。

3.2 乾燥方法

本研究では、スギ材の推奨乾燥スケジュールを参考に、表 1 に各種の条件を示す乾燥工程を採用した。

表 1 乾燥工程と乾燥条件

	時間 (h)	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	蒸射温度 (排出温度) (°C)
蒸煮	12	0	100	95
高温セット	24	120	92	88
	1	110	82	78
	1	100	72	68
乾燥	220	80	60	58
冷却	24	0	62	0

表 1 に示すように、この工程に要する乾燥時間は、高温セット後で約 220 h であった。乾燥工程では、スケジュール通りの乾燥の実施を確認するため、乾燥前に用意したシーリング材でシールしたモニター材の含水率を測定し、目標含水率とした 15 % 程度になったことを確認の上、乾燥を終了した。なお、ヒノキ材も同様のスケジュールで乾燥を行った。

3.3 内部割れの計測方法

木材内部の割れは、通常切断等によって調べる方法が採用されるが、本研究では CT スキャンを利用することで、非破壊で内部割れを計測することとした。対象は、乾燥後に断面 120 角に挽き直した製材 60 本である。計測範囲は、図 4 に概要を示すように、両木口面 1340 mm の距離を空けた 2640 mm の区間とした。これは、木口面からの乾燥の影響を議論から除狙いの他、別途実施する当該試験体に対する曲げ試験の支点間距離での計測を意図したためである。

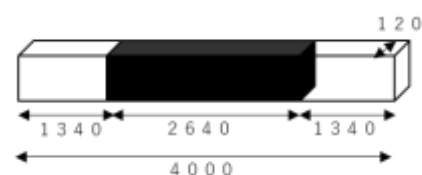
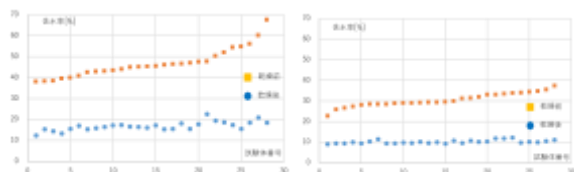


図 4 試験体の CT 撮影の範囲

4. 乾燥工程における試験体の変化

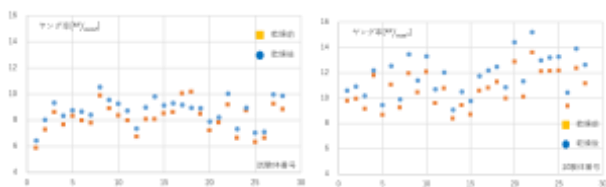
4.1 木材の含水率変化

乾燥前後で測定した含水率を樹種毎にまとめ、結果を図 6 にまとめる。同図横軸の試験体番号は、各樹種で乾燥前の含水率が低い順に付したものである。図 7 には参考として、図 6 と同じ試験体番号としたときの縦振動法によるヤング率の推定結果を示してある。



(a) スギ (b) ヒノキ

図 6 乾燥前後の含水率の比較



(c) スギ (d) ヒノキ

図 7 乾燥前後のヤング率の推定結果の比較

図 6 の各図より、まずスギで 15 ~ 20 % 程度、ヒノキで 10 % 程度の含水率に乾燥され、概ね目標の乾燥状態となったことが確認される。同図 (a) のスギは、乾燥前は含水率が高いもので 70 % 程度であり、乾燥後も乾燥前、すなわち試験体番号に従い含水率は高い傾向にあったが、最大 30 % 程度の個体差は約 10 % に縮む結果となった。同図 (b) に示すヒノキは、それらの変化がより小さい。これら乾燥による含水率の変化に対し、図 7 に示すヤング率の推定結果に、明確な傾向は見られないことが分かる。繊維飽和点以下の乾燥であることから、見かけのヤング率が乾燥後に上昇することは確認されるが、乾燥による変化とヤング係数には、明確な関係性は見られなかった。

4.2 CT スキャンによる計測結果と評価方法

CT スキャンにより、約 1 mm 毎に試験体断面の画像を得られており、本研究ではここから次の 2 つの情報を取り出し、整理する方針とした。1 つは木材表面から割れの最短距離、もう 1 つは内部割れ 1 つ当たりの面積である。説明のため、概要を図 8 に示す。

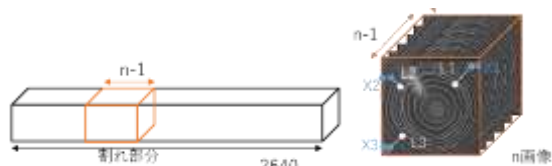


図 8 割れ測定方法

まず木材材表面から割れの最短距離は、10 画像(約 12 mm) ごとに側面から割れの最短距離 X を測定した。割れ面積にも同様の方法に従い、木口面の割れ長さ L を画像毎に計測後、一体の割れ毎に長さ L を分類し、それと次式に示すように、画像間の繊維方向の長さを乗じることで、内部割れの面積 A を評価した。

$$A_i = \sum_{j=1}^n L_{ij} \times 10 \frac{n-1}{n} \times \frac{2640}{(\text{総画像数}-1)} \quad (1)$$

式 (1) は、割れの長さを長方形に見立てたもので、第 1 項が面積を求める 1 辺の長さとして、画像の割れの平均値を求めたもの、第 2 項と第 3 項がもう 1 辺の長さに相当し、一体と見做す割れの枚数に CT 画像の距離を乗じて評価したものである。評価結果として、図 9 に内部割れの表面からの最短距離 X と当該内部割れの面積 A の関係を示す。

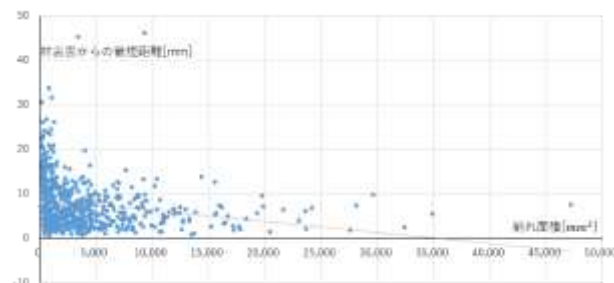


図 9 スギ 内部割れの最短距離と面積の関係

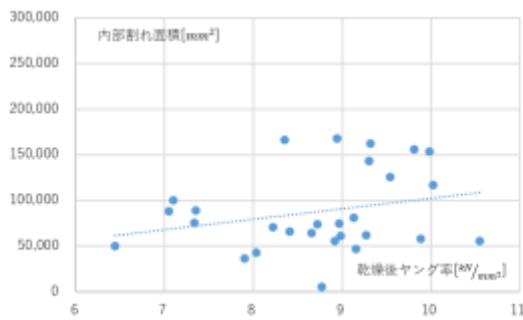
図 9 より、両者の関係にはバラツキが大きい、木材表面からの距離に近いほど、内部割れの面積は大きい傾向が読み取れる。割れの面積は、引張力による破壊の解放エネルギーと相関があることから、相対的に収縮率が高い表面付近では解放量が大きいと考えられるため、負の相関関係はこれらの考えに則した結果といえる。バラツキには複数の要因が考えられるが、大きくは乾燥収縮の大小関係と内部割れには関係性があることが確認される結果と言える。

5. 内部割れと試験体物性値との対応関係

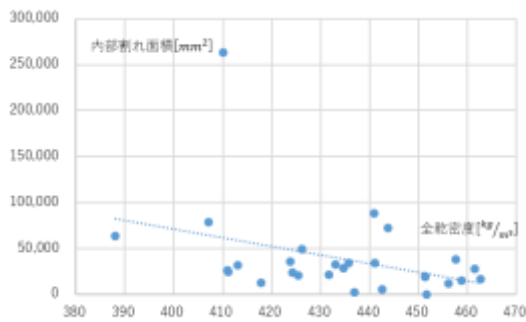
内部割れの決定要因を調べるため、表 2 に内部割れの面積と試験体の代表的な物性値である、全乾密度、ヤング率、含水率との相関係数を乾燥前後の結果それぞれに対してまとめる。表 2 の結果より、これら内部割れに影響を与え得る物性値との相関性は低い、その中でもスギ、ヒノキそれぞれで最も高い相関を示した結果を図 10 に示すことにする。

表 2 乾燥前後の内部割れと木材物性の相関係数

	乾燥前			乾燥後		
	全乾密度	ヤング率	含水率	全乾密度	ヤング率	含水率
スギ	-0.05	0.24	0.07	0.10	0.26	0.05
ヒノキ	-0.37	0.19	-0.09	-0.08	0.18	-0.09



(a) スギ：乾燥後のヤング率と内部割れ面積の関係



(b) ヒノキ：乾燥前の全乾密度と内部割れ面積の関係
図 10 各樹種の内部割れ面積と試験体物性値の関係

図 10 (a) の結果を見ると、相関係数も 0.26 と小さいことから相関性は曖昧な結果と言える。図 9 では予想と適した結果が得られたのに対し、この関係性が希薄な要因は、内部割れの統一的な評価を鑑みて面積の総和を試験体毎にまとめたためと考えられる。すなわち、結果のバラツキは木材内部の不均質性そのものを表すものと推察される。また広義に木材の不均質性を代表する節等の欠点も、この相関性を低下させる要因と言え、図 11 にいくつかの画像を例示するように、スギで特に多くの欠点を確認された。

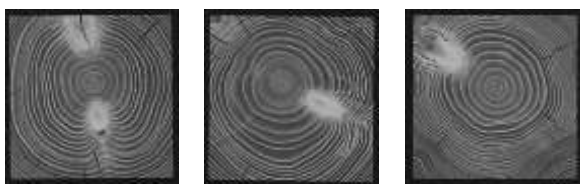
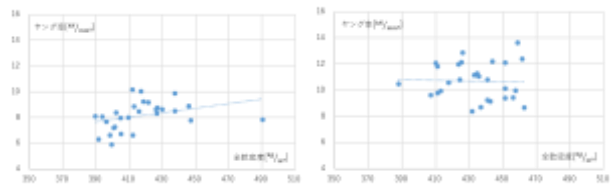


図 11 節等の欠点を含むスギ材の CT 画像

続いて図 10 (b) に示すヒノキの全乾密度と内部割れ面積の関係には、相関係数が -0.37 と明確ではないが、僅かな負の相関関係が認められる結果となった。一般に、全乾密度が高ければ、空隙が小さく細胞壁が厚い状態となるため、乾燥収縮は大きくなるはずである。その結果、内部割れと密度は正の相関関係にあると予想していたが、得られた結果は上記の通り、予想に反している。これには各試験体の特性が強く関係すると考えられるため、改めてスギ・ヒノキ各 30 体の密度とヤング係数の関係を図 12 に示す。



(a) スギ (b) ヒノキ

図 12 試験体の乾燥前の密度とヤング係数の関係

図 12 より、密度とヤング係数には相関性が低く、密度と収縮率には関係がないことが言える。したがって、ヒノキの割れにはその他の要素が関係していると考えられる。また含水率について、仕上がり含水率が低いほど収縮が進み割れ面積が大きくなるという報告もあるが本実験では乾燥前後の含水率が内部割れ面積に与える影響は見られなかった。

図 10 (a)(b)より、試験体毎の内部割れ面積の総和がスギとヒノキで約 2 倍の差があると言える。この差は材の構造によるものでスギはヒノキに比べ破壊ひずみが 0.5 倍と割れやすい条件が整っている。⁴⁾ さらに CT スキャンの画像を見るとスギは濃淡があり晩材と早材の密度差が大きく、ヒノキは濃淡が薄く晩材と早材の密度差が少ないと言える。この密度差も内部割れの原因と考えられる。

6. まとめ

本研究では、木材特性が高温セット乾燥による内部割れに及ぼす影響について解釈した。割れ 1 つ 1 つを見ると木材表面からの距離が近いほど内部割れ面積が大きい傾向がある。試験体毎の内部割れ面積とどの木材物性値にも強い相関関係は見られなかったが、ヒノキの全乾密度と割れ面積には弱い相関係数が見られた。材種による割れ面積の違いが生じ、同じ乾燥工程を行ったがスギはヒノキの 2 倍以上の割れが発生していた。

参考文献

- (1) 石川県林業試験場 石川ウッドセンター・安心・安全な乾燥材の生産・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) 古田裕三, 中嶋聖充, 中新絵里, 大越誠: 飽水木材の熱軟化特性に及ぼすリグニンおよびヘミセルロースの影響, 木材学会誌, 56(3), pp.132-138, 2010
- (4) 三好由華, 神代圭輔, 古田祐三, 木材の繊維に直交する(横)方向の変形や破壊現象へ影響する因子を探る, 木材総合研究所 研究成果選集 2019, pp.30-31