

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：82105

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K14505

研究課題名(和文) 乾燥における水分・温度履歴が木材の力学特性の経過に与える影響

研究課題名(英文) Effects of the cyclic changes in moisture content and drying temperature on the mechanical properties of wood

研究代表者

鳥羽 景介 (Toba, Keisuke)

国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等

研究者番号：10709322

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、木材の乾燥過程や乾燥後の使用環境における温・湿度の変動が、残留応力や乾燥割れ、力学特性などに与える影響を理解することが目的である。乾燥過程の表面ひずみの経時変化の測定から、高温セット処理過程の膨潤挙動は表面割れの兆候であり、処理後の温度条件が高い場合、材表面の引張残留応力が緩和した可能性を見出した。また、木材の乾燥履歴に対する力学特性の検証では、弾性域への影響はあまりみられなかったが、曲げ試験や圧縮試験後の破壊形態に着目すると、熱の関与に関係なく乾燥履歴により耐せん断力が減少した可能性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、木材利用において不可避である乾燥について、乾燥過程や木材利用時に起こる温度・湿度変化が木材に与える影響についての検証を試みた。乾燥過程での膨潤・収縮挙動の経過について、本研究で得られた木取りの影響や高い温度条件による残留応力の緩和といった新たな知見は、乾燥スケジュールの適正化を図る上で有益な知見であると考えられる。乾燥履歴による木材の耐せん断力の減少についても、木材科学における新規知見であることに加え、乾燥過程での不必要な湿度の増減を回避するべきであることを示唆する基礎的知見であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：This study investigated the effects of the temperature and humidity including their cyclic variation on the mechanical and physical properties of drying wood. The swelling behavior of the surface strain indicated the symptom of occurrence of surface crack during the process of high temperature setting treatment. In addition, relaxation of tensile residual stresses, which arose in the process of that treatment, were induced by application of higher drying temperature. Appearance of fracture morphology after material tests of wood specimens suggested that cyclic changes in moisture content of wood reduced the resistance to shear stresses regardless of heating.

研究分野：木質科学

キーワード：乾燥履歴 表面ひずみ 残留応力 含水率変化 乾燥前処理 木取り 脆化 破壊形態

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

木材の乾燥は製材の内部から水分を適切に取り除き、腐る・狂うといった欠点の抑制を目的とする工程である。工業材料である木材にとって乾燥は必要不可欠であり、不適切な場合、製材の市場価値や歩止りの低下が起きてしまう。一方で、木材業界では、乾燥の良し悪しを乾燥業務従事者の経験に大きく依存しているのが現状であり、木材の乾燥過程で起こる物理現象の科学的な裏付けが不十分である。

木材乾燥を科学的に解釈する際、“木材乾燥が熱・含水率・応力・寸法などの変化が同時進行で起こる複雑な現象”であることや、“生物材料である木材の実験的検証では個体によるばらつきが大きい”などの難点が挙げられる。また、人工乾燥スケジュールを例に挙げると、蒸煮、高温セット処理、中温乾燥といった複数の温・湿度条件に連続して曝される乾燥工程において、木材に起こる現象を網羅的に把握するには多大な労力と時間が必要である。そのため、既存の研究に目を向けると、木材乾燥スケジュールの構築や乾燥スケジュールと乾燥割れの関係といった実用面を考慮した研究や事例の蓄積が大半であり、乾燥過程で起こる物理現象のメカニズムにまで踏み込み、科学的な検証を試みた研究例は少ない。加えて、乾燥後の木材の使用環境における温・湿度の日変動や季節変動が力学特性に与える影響を考慮した“乾燥後の経過”に目を向けた研究例は皆無である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、木材の乾燥過程、および乾燥後の使用環境における“含水率と温度の変動”が、残留応力や乾燥割れ、力学特性などに与える影響を詳細に理解することである。既存の木材乾燥研究では、乾燥スケジュールの構築や乾燥割れ発生に関するデータの蓄積が行われているが、木材業界の乾燥現場では経験に基づく乾燥ノウハウが主導しているのが現状であり、乾燥研究と乾燥現場とで乖離がある。本研究ではとくに、木材乾燥の現場で想定されるような温・湿度条件下での乾燥過程、および乾燥材の経過に着目し、現象の把握、データの蓄積、メカニズムの解明を目指す。

### 3. 研究の方法

木材乾燥における含水率と温度の変化に主眼を置き、

A. 木材乾燥過程での力学特性の経過、B. 木材の使用環境条件が力学特性に与える影響、以上の2つについて実験・検討を行った。

A の「木材乾燥過程での力学特性の経過」では、図1に示すひずみセンサーを長さ600 mm、断面寸法が95×180 mmの心持ち平角、および120×120 mmの心持ち正角の表面に設置し、乾燥過程(蒸煮:乾球温度95、湿球温度95、8時間、高温セット処理:乾球温度120、湿球温度90、24時間、乾燥:乾球温度90、湿球温度60、184時間)における接線方向の表面ひずみの変動について、データの蓄積と検討を試みた。また、乾燥後の試験材中に発生する残留応力を調べるため、5 mmの試験片を各試験材から作製し、解放ひずみ、およびセット量についての測定を行った。

B の「木材の使用環境条件が力学特性に与える影響」では、乾燥後に木材が被る温・湿度の日変動や季節変動を想定した乾湿繰り返し処理(高温条件:105の高温期中での24時間の乾燥と煮沸による再膨潤、室温条件:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>を同封したデシケータ中で恒量となるまでの乾燥と水中での浸漬による再膨潤)を各木材試験片に1~7回ずつ与えた。その後、材料試験(引張、圧縮、曲げ、ねじり)を行い、ヤング率、強度、ひずみエネルギー等を調べた。また、試験後の破壊形態の観察、およびFTIRによる化学成分への影響についての検討も行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 乾燥過程における表面ひずみの変化

心持ち正角、および心持ち平角において乾燥過程における試験材表面の接線方向のひずみの経時変化を測定した(図2)。乾燥工程初期の蒸煮では、正角、平角ともに収縮傾向が認められ、平角の方が顕著であったことがわかった。その後の高温セット処理の過程では、一部の試験材において膨張傾向がみられたことがわかった。約0.5~1.0%であった表面ひずみの増加は、実験中に想定される熱膨張や材内の残留応力の解放だけでは説明しきれない値であり、表面割れの兆

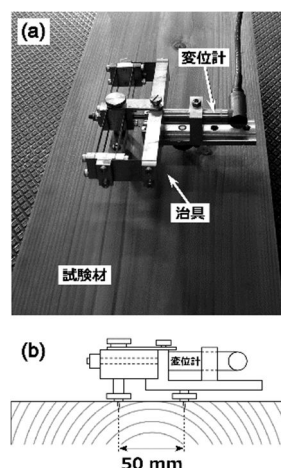


図1. 表面ひずみの測定の様子  
(a: 変位計を取り付けた試験材の様子, b: 治具の模式図)

候を検出した可能性が示唆される。また、平角よりも正角の方が膨張傾向を示した試験材が多かったことから、正角の方が表面割れ発生の危険性が高いと考えられる。一方、本研究では乾燥過程における表面ひずみの経過と試験材横断面に占める心材率との関係を調べるため、同一の供試樹木から連続的に試験材を作製して実験に用いた。その結果、両者にはあまり関係性が認められないことがわかった。

#### (2) 乾燥後の残留応力

乾燥後の試験材中の残留応力を検証するため、解放ひずみ、セット量の測定を行った。その結果、解放ひずみは乾燥条件に関係なく同程度であったことがわかった。また、試験材中の部位同士を比較したところ、試験材中心部に比べて表面部の方が大きな値であったことがわかった。一方、セット量は試験材表面部において乾燥条件による違いが認められた(図3)。すなわち、乾球温度が70の乾燥条件に比べ、90では小さな値であった。高温セット処理後の温度条件が高い場合、処理によって形成された試験材表面部の引張の残留応力が緩和された可能性が示唆される。

#### (3) 乾燥と湿潤を与えた木材の各種物理的性質

乾燥履歴を与えた各種試験片の材料試験を行ったところ、引張、圧縮、曲げの各試験において、ヤング率、および強度にはあまり影響がみられないことがわかった。一方で、曲げ試験におけるひずみエネルギーを検証したところ、熱が関与した処理を与えた試験片では減少したことがわかった。また、ねじり試験では、熱の影響に関係なく乾燥履歴によってせん断弾性係数、およびトルクがともに減少したことがわかった。以上のことから、乾燥履歴によって木材の脆化や耐せん断力の低下が起きた可能性が示唆される。

曲げ試験において破壊が発生した箇所を調べたところ(表1)、木材が乾燥履歴を被ったことによって、4点曲げ試験における荷重点下での破壊の発生が多くなったことがわかった。また、圧縮試験後の破壊形態を分類したところ、せん断型の発生が乾燥履歴によって増加したことがわかった。以上のことから、木材が乾燥履歴を被ることにより、処理時の熱の関与に関係なく耐せん断力が低下したと考えられ、この傾向はねじり試験の結果とも一致した。

FTIR による分析を行ったところ、 $1060\text{ cm}^{-1}$ 、 $1160\text{ cm}^{-1}$ 、 $1725\sim 50\text{ cm}^{-1}$  といったヘミセルロースに起因する波数域において、乾燥履歴による吸光度の変化がみられた。また、この変化は熱を伴う乾燥履歴の影響の方が顕著であった。熱劣化などの何らかの変質が分子レベルにおいて起きたと考えられるが詳細は不明である。

#### (4) まとめ

本研究では、木材の乾燥過程や使用環境の温度・湿度の変化が木材の力学的性質に与える影響についての検証を試みた。その結果、乾燥時の温度条件によっては乾燥前処理時の応力状態が緩和すること、乾燥後の木材が被る温湿度変化が重なると耐せん断力が低下することを明らかにした。これらの成果は、乾燥過程や木材の使用環境における木材の物理的性質の変化を理解する上での基礎的な知見であり、今後の木材乾燥技術のさらなる進展にも寄与すると考えられる。

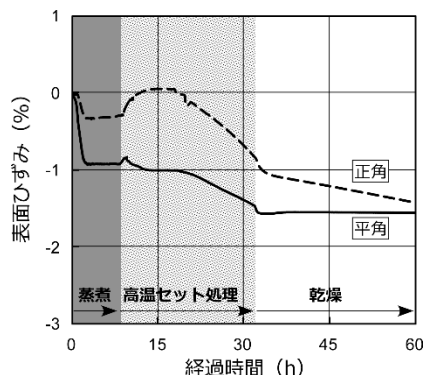


図2. 表面ひずみの測定結果の一例

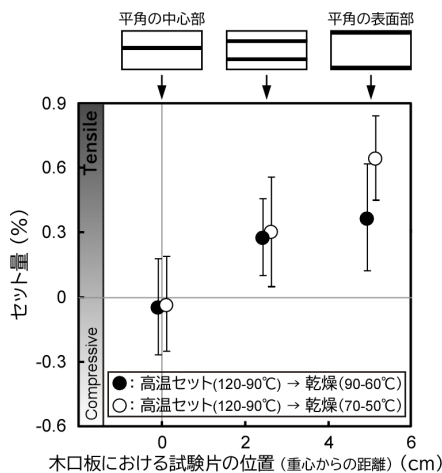


図3. 試験材中のセット量

表1. 曲げ試験における破壊箇所

		曲げ試験後の破壊発生箇所割合 (%)		
		未破壊	荷重点下	荷重点間
Control	-	25.0	33.3	41.7
室温条件による乾燥履歴	1	25.0	33.3	41.7
	2	25.0	41.7	33.3
	3	30.0	40.0	30.0
	4	16.7	50.0	33.3
	5	0	66.7	33.3
	6	18.2	63.6	18.2
	7	8.3	83.3	8.3
高温条件による乾燥履歴	1	9.1	36.4	54.5
	2	8.3	58.3	33.3
	3	0	50.0	50.0
	4	16.7	50.0	33.3
	5	8.3	50.0	41.7
	6	0	58.3	41.7
	7	8.3	58.3	33.3

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 鳥羽景介、小林功、山本浩之、栗田悟	4. 巻 73
2. 論文標題 高温セット処理を用いた乾燥過程で起こるスギ心持ち材表面の収縮・膨潤挙動	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 木材工業	6. 最初と最後の頁 550-554
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鳥羽景介、中井毅尚、内迫貴幸、渡部刻太、飯田隆一
2. 発表標題 乾燥・湿潤履歴が木材の力学特性に与える影響 II
3. 学会等名 第70回日本木材学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鳥羽景介、中井毅尚
2. 発表標題 乾燥温度の違いが木材の横方向の力学特性に与える影響
3. 学会等名 第28回日本MRS年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鳥羽景介、中井毅尚、飯田隆一
2. 発表標題 乾燥・湿潤履歴が木材の力学特性に与える影響
3. 学会等名 第35回日本木材加工技術協会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鳥羽景介、中井毅尚、飯田隆一、大谷忠
2. 発表標題 木材の力学特性に対する乾燥温度の影響
3. 学会等名 第69回日本木材学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鳥羽景介、松元浩、石田洋二、村野朋哉
2. 発表標題 異なる乾燥条件におけるスギ心持ち平角の乾燥後の残留ひずみの違い
3. 学会等名 第30回日本MRS年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鳥羽景介、松元浩、石田洋二、村野朋哉
2. 発表標題 高温セット処理を用いた各種乾燥スケジュールにおける乾燥後のスギ心持ち平角表面の残留応力状態
3. 学会等名 第71回日本木材学会大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------