

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14926

研究課題名（和文）木材乾燥過程における水分分布の可視化およびAI・シミュレーション技術の開発

研究課題名（英文）Visualization of Moisture Distribution and Development of AI and Simulation Technologies in the Wood Drying Process

研究代表者

馬 特 (Ma, Te)

名古屋大学・生命農学研究科・特任講師

研究者番号：70824316

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、近赤外ハイパースペクトルイメージング（NIR-HSI）法によって得られた材内の水分分布の可視化結果を元に、パラメータを調整して再現性が高い木材乾燥モデルの構築に成功した。このモデルでは、乾燥時には密度が高い部位の乾燥速度が遅いこと、脱水が進むにつれて木材試料の表層が大きな勾配が生じることなどの特徴が実測値と一致していることを確認した。また、X線マイクロCT画像から木材の水分移動をシミュレーションできた。さらに、X線CT法によって得られる材の変形情報に、有限要素法やAI学習などを適用して木材乾燥および変形の予測モデルの構築にも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

木材乾燥過程における水分移動メカニズムは非常に複雑であり、自由水・結合水移動にともなう含水率変化に起因する変形、割れなどの材料特性変化の解明には、高い空間分解能で迅速に材内の水分分布を測定できる手法の開発が重要である。本研究では、近赤外ハイパースペクトルイメージング（NIR-HSI）法によって得られた材内の水の分布情報、およびDIC法やX線CT法によって得られた材の変形情報に、有限要素法やAI学習などを適用して、木材の乾燥過程における3次元水の分布および材の変形を正しくシミュレーションできた。これにより、含水率の変動による材の割れ発生メカニズムの解明や、最適な乾燥条件確立が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we successfully constructed a highly reproducible wood drying model by adjusting parameters based on the visualization results of moisture distribution within the wood obtained using near-infrared hyperspectral imaging (NIR-HSI) method. The model confirmed two main characteristics consistent with actual measurements: (i) areas with higher density dried at a slower rate, and (ii) the surface layer of the wood sample appeared a significant gradient as dehydration progresses. Additionally, we successfully simulated moisture movement in wood using X-ray micro-CT images. By applying finite element methods and AI learning to the moisture distribution information obtained by NIR-HSI and the deformation information of the wood obtained by X-ray CT, we also succeeded in constructing a crack prediction model.

研究分野：木質科学、応用分光学、農業情報工学

キーワード：木材乾燥 NIR-HSI法 X線CT法 有限要素法 AI学習 3次元シミュレーション技術の開発

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。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

木材中の水は、内腔や細胞間隙に存在する自由水と細胞壁に化学的に結合している結合水に大きく分類される。結合水の増減は木材の変形や割れなどを誘発し、強度特性に大きな影響を及ぼす。そのため、より効率的な乾燥を達成するためには、自由水および結合水の材内分布特性をリアルタイムで把握することが重要である。これまでも、磁気共鳴画像 (MRI) による木材中の自由水・結合水変化の観察や X 線 Computed Tomography (CT) 画像による精細な水分分布のモニタリングなど複数報告されているが、測定時間や測定環境を考慮すると、乾燥過程で刻々と変化する材内の水分分布 (とくに繊維飽和点以下における結合水の拡散) を迅速かつ高い空間分解能での可視化は困難である。一方、分光分析と画像解析を融合させた近赤外ハイパースペクトラルイメージング (NIR-HSI) 法は上記装置と比較すると低価格でありながら、非破壊、高精度、準リアルタイムで材内の水分分布を調べることが可能で、近年様々な基礎および応用研究に適用されている。しかし、「O-H 伸縮振動の振動数、すなわち、水素結合力に関する情報が正確に捉えられる」という本手法の長所はまだ十分に活用されていないのが現状である。NIR-HSI 法によって木材内部の自由水・結合水の分布特徴が可視化できると、熱および水分の拡散係数から乾燥過程のモデル化が可能となり、材内の水分移動機構を様々な角度から理解できる。また、結合水の移動にともなうひずみや割れなどの現象を有限要素法 (FEM) や AI 学習によって予測できるようになる。さらに、材の割れメカニズムの解明や、最適な乾燥条件確立に繋がることも大いに期待される。

2. 研究の目的

本研究では、①分光情報と空間情報を同時に獲得できる近赤外ハイパースペクトラルイメージング法 (NIR-HSI) を用いて、様々な乾燥条件下の木材内部の自由水・結合水分布を可視化することにより、熱および水分拡散係数から木材乾燥過程をモデル化し、さらに、②デジタル画像相関法 (DIC) および X 線 CT 法等を用いて、乾燥応力によって生じた木材試料の変化を観察し、有限要素法および人工知能 (AI) による変形および割れの予測アルゴリズム開発を目指す。本研究により、含水率変化による材の割れ発生メカニズムの解明や、最適な乾燥条件確立が期待できる。

3. 研究の方法

3-1. NIR-HSI 法による木材中における水分移動機構のモデル化

木材の含水率予測モデルを構築するため、実験試料としてヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) を用いた。含水率予測モデル構築用の試料 A は 15 個体、寸法は繊維方向 (L) : 20 mm × 接線方向 (T) : 15 mm × 放射方向 (R) : 4 mm に調整した。含水率マッピング用の試料 B の寸法は 30、60、および 90 mm (L) × 30 mm (T) × 30 mm (R) に調整し、各 10 個体準備した。試料 A を相対湿度 (RH) が異なるデシケータ内に入れ、含水率が平衡状態に達した後、重量測定と近赤外 HSI カメラによる LT 面の撮影を行なった。その後、木材試料を十分に乾燥させ (103 °C, 48 時間)、全乾重量を測定した。さらに、Partial Least Squares (PLS) 回帰分析に基づいて実測したヒノキ材の含水率と HSI 装置で測定した近赤外スペクトルとの関係を探索した。吸湿・脱湿過程における材内の結合水分布情報を可視化するため、RH 95 - 99% に調湿したデシケータ A と 1 - 5% に調湿したデシケータ B を用意した。気乾状態の試料 B をデシケータ A に 2 週間放置した後、デシケータ B に移動した。その後、試料 B を段階的に取り出し、繊維方向と平行に素早く切断し、その断面を近赤外 HSI カメラで撮影した。得られた分光画像に含水率予測モデルを適用し、材内の結合水の動的変化の視覚化を試みた (同じ測定をデシケータ B から A の順にも行った)。木材中における水分移動機構のモデル化を行うため、コンピュータ上に試料を模倣した 3 次元のモデルを作成し、近赤外 HSI 法によって得られた材内の結合水分布の可視化結果を元に、シミュレーションのパラメータを調整した。木材内部の水分移動は Fick の法則、熱移動は Fourier の法則に基づいて、0.1 秒後の相対湿度と温度を繰り返して算出した。この計算は、隣接する要素との相対湿度と温度の勾配を用いて各要素で行った。

3-2. 乾燥応力によるひずみ・割れの観測

材の変形計測を非接触かつ全視野で計測するため、木材表面の 3 次元形状およびひずみ分布を計測し、画像間の僅かなずれは Iterative Closest Point (ICP) などのアルゴリズムによって解消した。また、計測結果の妥当性について、レーザ変位計を用いて 3 次元形状測定システムにより検証を行った。さらに、X 線 CT 撮影も実施し、木材内部の割れなどを把握した。

3-3. AI・シミュレーション法によるひずみ・割れ予測モデルの構築

自由水・結合水の空間分布と材の変形情報に、有限要素法、AI 学習などを組み合わせて材の変形・割れの予測を行った。また、新しい木材試料を準備し、乾燥応力が原因で実際に生じたひずみ・割れの状況との比較を行い、水分分布および乾燥温度のパラメータを変えながらシミュレーションを繰り返した。

4. 研究成果

2022 年度には、近赤外ハイパースペクトラルイメージング (NIR-HSI) によって得られた材内の水分分布の可視化結果を元に、シミュレーションのパラメータを調整して再現性が高い木材乾燥モデルの構築に成功した(図1)。このモデルでは①乾燥時には密度が高い部位の乾燥速度が遅いこと、②脱水が進むにつれて木材試料の表層が大きな勾配が生じることなどの特徴が実測値と一致していることを確認した。

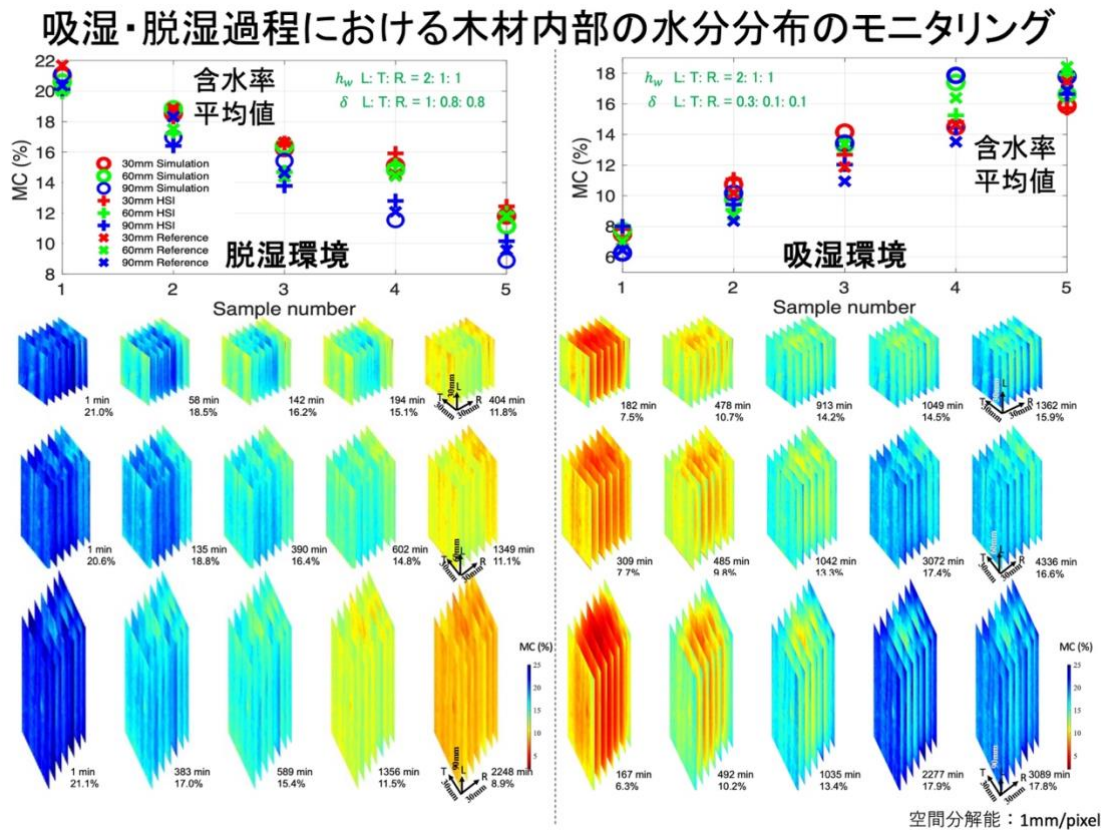
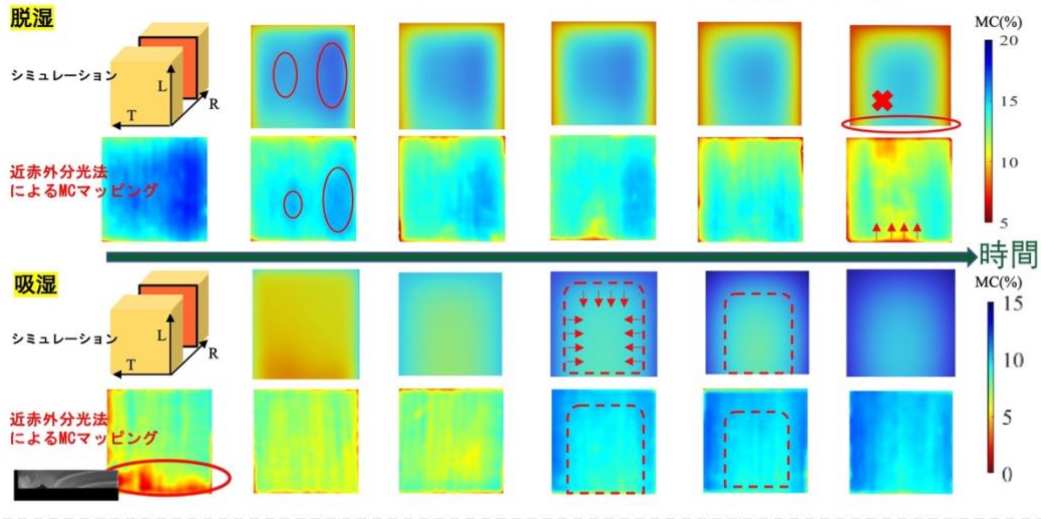


図 1. NIR-HSI 法による材内の水分分布の可視化結果

2023 年度には、X 線マイクロ CT 画像から木材の水分移動をシミュレーションすることに成功した。FEM 解析でシミュレーションした含水率分布が NIR-HSI で実測した乾燥中木材の含水率分布とよく一致していることを確認した。また、木材内部から加熱すると水分傾斜が外部からの加熱より小さかった(図2)。さらに、NIR-HSI 法によって得られる材内の水分分布情報および X 線 CT 法によって得られる材の変形情報に、有限要素法や AI 学習などを適用して、乾燥および変位の予測モデルの構築にも成功した(図3)。以上一連の研究によって、本研究の目的である「非破壊含水率測定手法、有限要素法や AI 学習によって木材乾燥過程のモデル化」に大きく前進したといえる。さらなる研究を進めることで、含水率の変動による木材の割れ発生メカニズムの解明や、最適な乾燥条件の確立にも期待できる。

シミュレーションとMCマッピング結果の比較



その他の応用例 1：実験研究では達成が難しい乾燥温度を変更

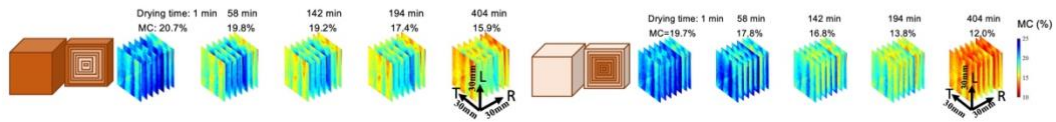


図 2. X 線マイクロ CT 画像から木材の水分移動をシミュレーション

Deep learning-based image registration

Image registration is the process of **matching corresponding points** between two or more images, which were taken at **different times**. The purpose of image registration is to ensure that the same features in an image are in the same position in different images. This allows further analysis or image processing operations to be performed

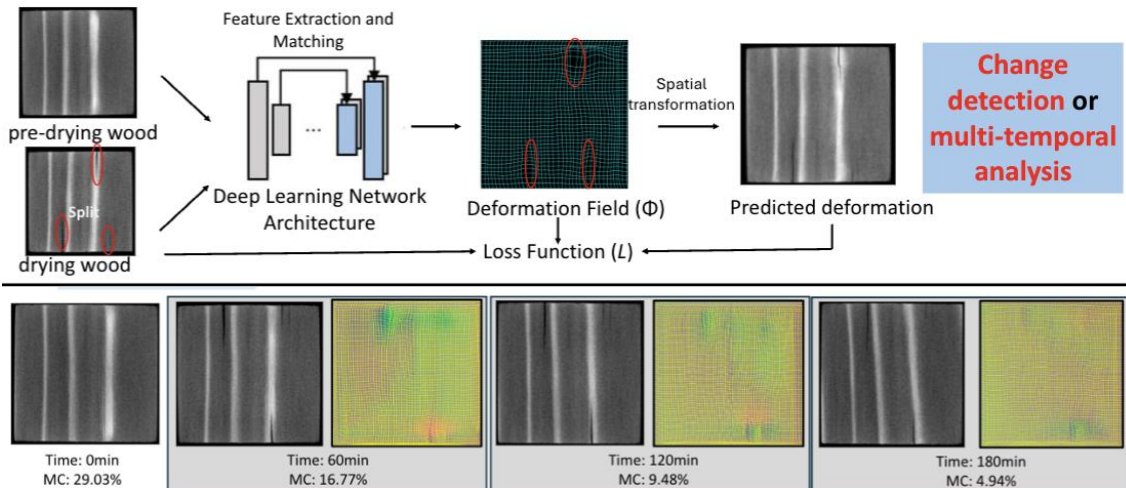


図 3. 有限要素法や AI 学習などを適用して、乾燥および変位の予測モデルの構築

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 Ma Te, Morita Genki, Inagaki Tetsuya, Tsuchikawa Satoru	4. 巻 76
2. 論文標題 Experimental study and three-dimensional modeling of moisture transport in wood by means of near-infrared hyperspectral imaging coupled with a heat and mass transfer simulation method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Holzforschung	6. 最初と最後の頁 699 ~ 710
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1515/hf-2021-0203	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 -

1. 著者名 Zeng Wenpeng, Fujimoto Takaaki, Inagaki Tetsuya, Tsuchikawa Satoru, Ma Te	4. 巻 70
2. 論文標題 Three-dimensional modeling of moisture transport in wood using near-infrared hyperspectral imaging and X-ray computed tomography in conjunction with finite element analysis	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Wood Science	6. 最初と最後の頁 9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s10086-023-02120-2	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Tsuchikawa Satoru, Inagaki Tetsuya, Ma Te	4. 巻 9
2. 論文標題 Application of Near-Infrared Spectroscopy to Forest and Wood Products	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Current Forestry Reports	6. 最初と最後の頁 401 ~ 412
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s40725-023-00203-3	査読の有無 無
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2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Wenpeng Zeng, Te Ma, Satoru Tsuchikawa, Tetsuya Inagaki
2. 発表標題 Three-dimensional modeling of moisture transport in wood by means of near-infrared hyperspectral imaging and X-ray computed tomography coupled with finite element analysis method
3. 学会等名 第73回日本木材学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Te Ma, Wenpeng Zeng, Satoru Tsuchikawa, Tetsuya Inagaki
2. 発表標題 Visualize and simulate the three-dimensional water distribution within softwood using near-infrared hyperspectral imaging coupled with a mass transfer simulation method
3. 学会等名 the 21st International Conference on Near Infrared Spectroscopy (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------	---------