

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：82105

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05628

研究課題名(和文) X線CTイメージングを用いたミクロレベルの木材水分移動機構の解明

研究課題名(英文) A mechanism of micro-scale moisture transfer in wood using X-ray micro-CT and image processing techniques

研究代表者

渡辺 憲 (Watanabe, Ken)

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：90582734

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,200,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロフォーカスX線CT装置を用いて木材に含まれる水分が乾燥に伴いどのように移動するのかを調べた。その結果、木材の空隙に存在する水分(自由水)は液体の状態で細胞間を移動していることが観察できた。木材の年輪として色が濃く見える部分(晩材と呼ぶ)と淡く見える部分(早材と呼ぶ)の細胞は、形状が異なるものの細胞壁自体の密度は同じであるとこれまで考えられてきた。これに対して今回撮影したCT画像を解析した結果、細胞壁の密度は晩材よりも早材の方が高いことが確認された。この知見は、木材の組織や樹木の生長に関する研究に影響を与えるものと思われる。

研究成果の概要(英文)：Micro-scale moisture transfer in wood was investigated using X-ray micro-CT and image processing techniques. It was observed that free water transferred in a liquid form from cell to cell. Although it is commonly said that the density of cell wall in latewood has the same density as that in earlywood, the present analysis of CT images showed that the density of cell wall in latewood is lower than that in earlywood. This finding may have an impact on the research of wood anatomy and tree growth.

研究分野：木材乾燥

キーワード：木材 水分分布 非破壊計測 マイクロフォーカスX線CT

### 1. 研究開始当初の背景

樹木にはたくさんの水分がもともと含まれており、これを伐採し木材製品として利用するためには、木材の中から水分を取り除かなければならない。また、木材を建築材料等に利用する際には、環境の変化に応じて吸湿・脱湿を繰り返し寸法変化が生じる。このように様々な場面において水分は木材の中を移動しており、木材を効率よく加工・利用するためには、木材の中を水分がどのように移動するのかを理解することが重要である。

学術的にみると、木材の水分移動に関する研究は長年にわたって行われており、木材をマクロな材料として捉えたときの水分移動については、拡散や透過に基づく理論が確立している。一方で、ミクロレベルの水分移動については木材の組織構造から推測した仮説は提案されているものの、水分分布を計測する技術が確立されておらず、仮説を検証することが非常に難しい状況にある。

その一方で、近年、電子顕微鏡やマイクロフォーカス X 線 CT などの高分解能分析装置の発達により、ミクロレベルの木材組織構造を可視化することが可能となってきた。これらの技術を応用すれば、木材内部の水分分布をミクロレベルで計測することも可能になるのではないかと考えられる。

申請者はこれまでに、木材を乾燥したときに水分がどのように移動するのかをマクロレベルで評価してきた。その中で、X 線 CT 装置を用いて木材の 3 次元画像を撮影し、得られた CT 画像に画像処理を施すことによって水分分布と含水率分布を同時に計測する手法を開発してきた。そこで、この開発した技術とマイクロフォーカス X 線 CT を組み合わせることによって、ミクロレベルで水分分布を計測し、木材の中を水分がどのように移動するのかを明らかにするという研究を着想するに至った。

### 2. 研究の目的

マイクロフォーカス X 線 CT 画像に画像処理を施すことによって木材内部の水分分布を細胞レベルで計測する手法を開発し、木材を乾燥させたときに水分が細胞間をどのように移動するのか明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

まず 1 年目に、高分解能型マイクロフォーカス X 線 CT 装置を選定し、TDM1000H-S $\mu$  (ヤマト科学 (株) 製) に決定した。続いて、木材 (樹種はスギ) の細胞壁が鮮明に撮影可能な撮影条件を試行錯誤で決定した。

2 年目には、木材を乾燥させながら X 線 CT 画像の撮影を行った。気乾状態のスギ角材辺材部から寸法 20 mm (放射方向)  $\times$  1.2 mm (長さ方向)  $\times$  1.2 mm (接線方向) の小試験片を 1 つ切り出した。水に 24 時間含浸して飽水に近い状態にした後、小試験片を収縮チューブに

入れて密封した。撮影直前にカッターを用いてチューブごと試験片を接線断面で切断し、すみやかに切断面付近の CT 画像を撮影した ( )。撮影位置は切断面の隣接部から直径 800  $\mu$ m、高さ 800  $\mu$ m の円柱領域とした (図 1)。撮影中は切断面から乾燥が進行しないようにタフグリップ (ピンク A、小林製薬 (株) 製) でシールした。撮影後、25  $\pm$  17%RH の室内に試験片を 1 分間静置し、再び CT 画像の撮影を行った ( )。同様に室内で 7 分 ( )、10 分 ( )、20 分 ( )、さらにシリカゲル入りのデシケータ内で 30 分静置した後 ( ) に CT 画像の撮影を行い、計 6 つの CT 画像を取得した (図 2)。その後、試験片を全乾状態になるまで乾燥し、再度 CT 画像の撮影を行った。

3 年目には、乾燥過程における一連の CT 画像を解析し、木材内部の水分分布を詳細に調べた。

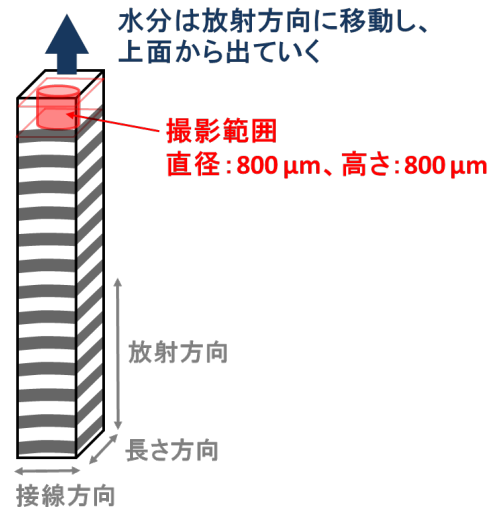


図 1 試験片と CT 画像の撮影範囲。試験片の色の濃い部分が年輪にあたる。

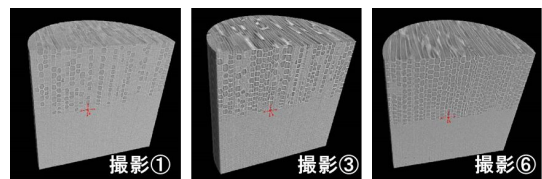


図 2 乾燥過程における試験片の 3 次元 CT 画像

### 4. 研究成果

木材内部の水分は細胞の空隙に存在する「自由水」と細胞壁に結合している「結合水」の 2 つに分けられる。

乾燥過程における木口断層像と自由水の分布を図 3 に示す。乾燥が進行するにつれて全体的に自由水が徐々に抜けていく様子がみられた。最後に撮影を行った では、早材部の自由水はほとんど無くなったのに対して、晩材部の空隙は自由水で満たされたままであった。このことから、早材と晩材の境界面で水分移動の障害が起こっていたと考え

られる。

図3の丸で囲んだ部分に注目すると、撮影①では自由水が無く、撮影②では同じ場所自由水が存在し、撮影③で再び消失した。このことから、木材の表面付近において空隙に存在する自由水は内部に気泡の含まれた毛細管中の水分として存在し、液体の状態で細胞間を移行することが観察された。これは、毛細管中の水分の両端におけるメニスカスの蒸気圧差によって自由水の移動が起こるといふ従来の説が正しいことを示唆している。

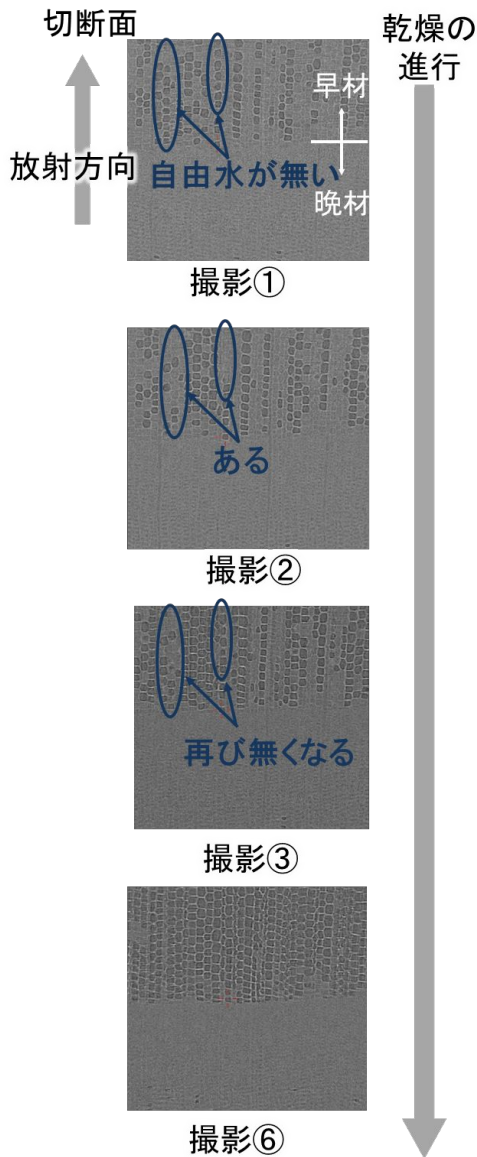


図3 乾燥過程における木口断層像と自由水の分布

結合水の水分移動を評価するため、水分分布の定量計測を試みた。その手順は、(1)一連のCT画像を重ね合わせ、(2)その差分画像を取得し、(3)取得した画像の輝度値を水分量もしくは含水率に変換する、という流れである。CT画像撮影時のサンプルの配置やサン

プル自体の収縮変形が原因で、一連の画像を直接重ね合わせたときに数マイクロメートルから数十マイクロメートルのずれが生じ、差分画像を正確に得られなかった。そこで、画像の並行移動、回転およびワーピング処理によって一連のCT画像を細胞壁レベルで重ね合わせ、その後(2)の差分画像を取得した。ただし、(3)の差分画像の輝度値を水分量に変換するのに失敗したため、結合水の定量化に至らず、結合水の移動については検討できなかった。

当初予定していなかった成果として、木材の細胞壁の密度に関する新たな知見が得られた。全乾時のスギ辺材のX線CT画像を用いて、木材の年輪として色が濃く見える部分(晩材と呼ぶ)と淡く見える部分(早材と呼ぶ)の細胞壁の密度を比較した。一般に晩材と早材の細胞は形状が異なるものの細胞壁自体の密度は同じであると考えられてきた。これに対して、密度と比例関係にある画像の輝度値は晩材よりも早材の方が高く(図4)、細胞壁の密度は晩材よりも早材の方が高いことが確認された。この知見は、木材の組織や樹木の生長に関する研究に影響を与えるものと思われる。

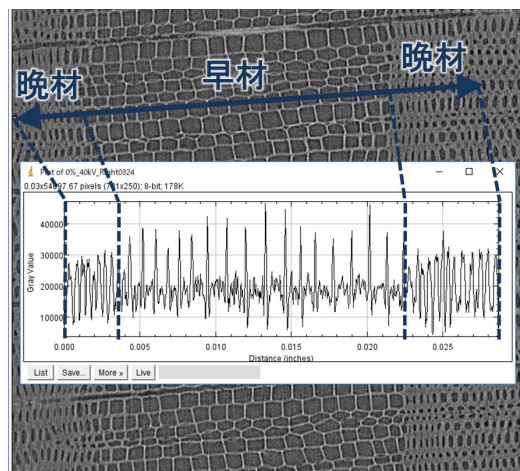


図4 CT画像の木口断層像における早晩材の輝度値(密度)分布

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計1件)

WATANABE Ken, Micro-scale measurement of moisture content in wood using X-ray micro-CT, IUFRO 2017 Division5 CONFERENCE, 5.04 Posters, prof412, 2017年

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況（計0件）

6．研究組織

(1)研究代表者

渡辺 憲（WATANABE, Ken）

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：90582734