

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：82105

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20594

研究課題名（和文）木材組織を満たす水の流入過程から探る多湿心材の発生メカニズム

研究課題名（英文）Anatomical analyses and water visualization to clarify water inflow process of wet-heartwood formation

研究代表者

山岸 松平（Yamagishi, Shohei）

国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・任期付研究員

研究者番号：20944119

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：特定の広葉樹で確認される多湿心材（辺材よりも高い含水率を示す心材）について、その水の流入過程や、木部組織構造との関係を明らかにすることを目的に、多湿心材をもつ樹種の生材中の水分分布を可視化するとともに、組織構造を観察した。多湿心材をもつとの見解があるケヤキ、ヤチダモ、ユーカリの3樹種の幹内における細胞レベルの水分分布が明らかになり、ケヤキの多湿心材については晩材側から水が流入していること、ユーカリは多湿心材というよりも幹全体が高含水量の樹種であることなどが示唆された。また、多湿心材の発生と木部繊維の特性に関する関係があることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

木材利用上の問題が指摘されている多湿心材について、その現象理解に寄与する水分分布に関する知見を3樹種で得るとともに、従来の含水率計測に基づく樹幹内の水分分布に関する知見のなかに、必ずしも実質的な水分分布を表現していないものが紛れている問題も浮き彫りにした。また、従来、通水機能が重要視されてこなかった木部繊維について、多湿心材との関係からその通水特性を検討することの学術的意義を提示した。本成果は樹木生理学や木材学を含む基礎・応用分野の両面に貢献するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Wet-heartwood is heartwood that exhibits higher moisture content than sapwood and it was found in certain angiosperm species. In order to clarify the water influx process of wet-heartwood formation and to consider the relationship between xylem anatomy and wet-heartwood, this study analyzed water distribution and anatomical structure in the wet-heartwood trees. Visualization of cellular-level water distribution in the trunks of three species, *Zelkova serrata* (Keyaki), *Fraxinus mandshurica* (Yachidamo), and *Eucalyptus saligna*, which are considered to have wet-heartwood, suggests that water inflows proceed from latewood in the wet-heartwood of *Zelkova serrata*, and that *Eucalyptus saligna* have high water content throughout the trunk rather than a wet-heartwood. This study also suggest the relationship between wet-heartwood formation and characteristics of wood fibers.

研究分野：木材解剖学

キーワード：多湿心材 含水率 木部繊維 クライオ走査電子顕微鏡 広葉樹 ケヤキ ユーカリ ヤチダモ

## 1. 研究開始当初の背景

伐採されたばかりの木材(生材)に含まれる水の量や分布は、丸太の重量や、乾燥や燃焼に必要なエネルギー、割れの発生リスクなどに影響することから、木材利用における重要な基礎知見の1つである。これまで多くの樹種で生材の含水率が調べられ、広葉樹では、樹種ごとに多様な含水率分布を示すことが明らかにされた(例えば、矢沢 1964)。そのなかで、特に木材利用上の問題になるのは、幹の中央部(心材:木材解剖学では、柔細胞の死滅によって定義される)が外周部(辺材)よりも高い「多湿心材」と呼ばれるものである。多湿心材は、丸太の運搬や乾燥コストを増大させるだけでなく、寒冷地では凍裂(氷点下にさらされた立木の幹が割裂する現象)の原因となることも指摘されている(石田 1963; 佐野 1996など)。

多湿心材をもつ樹種に関する知見は得られている一方、その発生メカニズムについては未解明な点が多い。外傷に起因するという見解のほか、バクテリアの繁殖に起因する、該当樹種の心材形成に際して必然的に起こるなどの見解がある(Ward & Pong 1980)。しかし、これらは木材の中で起きる水集積の過程を詳しく観測したうえで提案されているものではなく、その妥当性を評価するための証拠は十分に揃っていない。多湿心材の発生メカニズムを明らかにするためには、多湿心材の発生過程における水の流入を、少なくとも細胞レベルの微視的なスケールで明らかにしていく必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、多湿心材における水分分布を細胞レベルで明らかにするとともに、多湿心材への移行部における各細胞へ水が流入する順番を明らかにすることを目的とした。また、この水の流入が樹種特異的な木材組織の構造に影響を受けているという予測をもとに、多湿心材の発生と木材組織の特徴に関係があるかも調べた。とくに多湿心材では、通水に特化した「道管」だけでなく、一般に通水機能が限定的であるとされる「木部繊維」にも水が流入していると想定されることに着目し、とくに木部繊維の構造と水分分布の関係を詳しく分析した。

## 3. 研究の方法

### (1) 多湿心材における水分分布の解析

多湿心材ならびに多湿心材への移行部における細胞レベルの水分分布を明らかにするため、多湿心材をもつとの見解があるケヤキ、ヤチダモ、ユーカリ(本研究ではサリグナユーカリを供試)の3樹種を対象に、立木を伐採し、地上高の異なる3~6か所から小丸太と円板を切り出した。小丸太は速やかに液体窒素で凍結して内部の水分分布を固定した。

#### 含水率の測定

切り出した円板を乾かないうちに直径方向に1cmごとに分割し、得られた各分割片の生材含水率と容積密度をそれぞれ絶乾法と浮力法で測定した。また各分割片内の水の充填率や水分量の指標として、相対含水率(生材含水率/最大含水率、最大含水率は容積密度から計算)と体積当たりの水分量((生材重-絶乾重)/生材体積)を求めた。

#### 水分分布の可視化

凍結した小丸太から、凍結状態を維持したまま厚さ5mmと9mmの板を切り出し、前者はそのまま軟エックス写真の撮影、後者はそこからさらに得た小片をクライオ走査電子顕微鏡観察に供試し、細胞レベルの水分分布を可視化した。

### (2) 多湿心材に関わる木材組織構造の解析

多湿心材をもつとの見解がある樹種を含む木材標本について、木材組織を光学顕微鏡的に解析するとともに、木部繊維の壁孔を電界放出形走査電子顕微鏡で観察した。

## 4. 研究成果

### (1) 多湿心材における水分分布

生材含水率、相対含水率、体積当たりの水分量の直径方向の分布

供試した3樹種ともに生材含水率は、辺材よりも心材で高くなる傾向が確認された(図1A-D。ここでは辺材と心材を目視での色調の違いから判別した)。一方、相対含水率や体積当たりの水分量で見ると、ケヤキとヤチダモでは、生材含水率と同様に辺材よりも心材の値が高い傾向であったが、ユーカリでは、辺材と心材のどちらも同様に多量の水を含んでおり、むしろ地上高の高い部分では、心材の値が低い傾向にあった(図1A'-D')。これは、供試したユーカリの容積密度が辺材よりも心材で低く(図1C、D)、重量を基準とする生材含水率において、心材の値が過大評価されているためと考えられる。

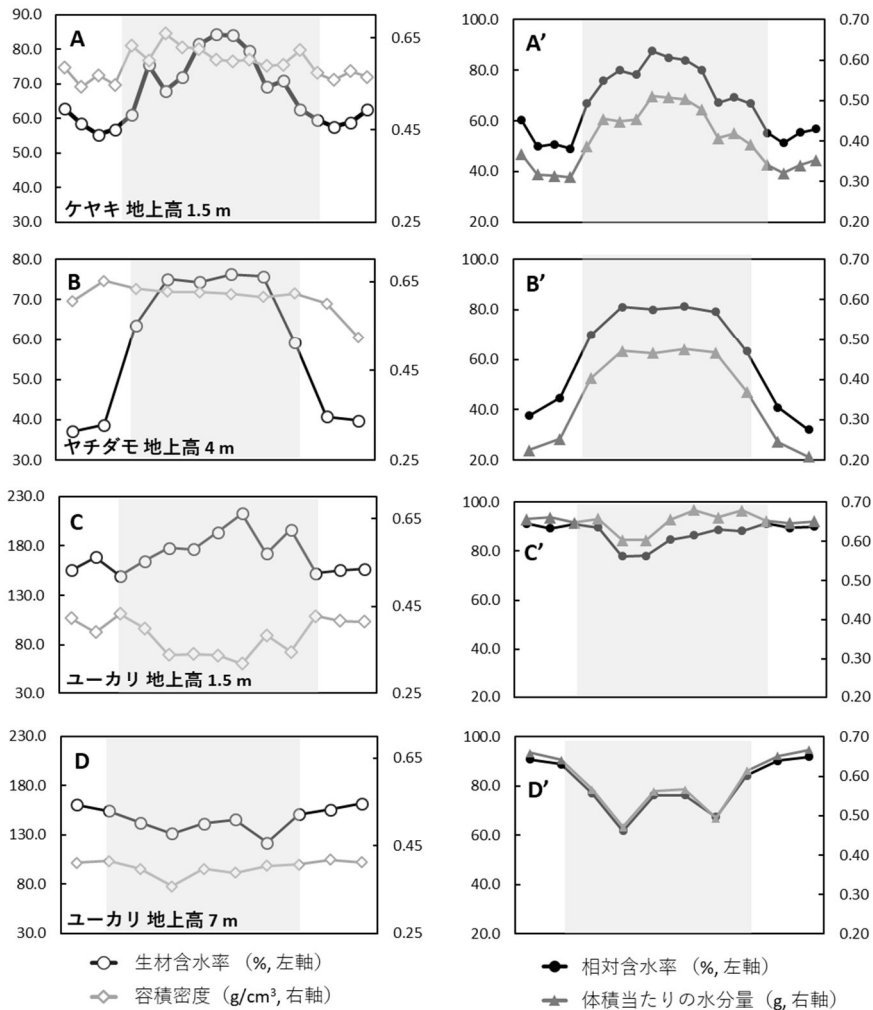


図1 ケヤキ、ヤチダモ、サリグナユーカリにおける生材含水率、容積密度、相対含水率、体積当たりの水分量の直径方向分布。網掛け部は心材の領域（材色より判断）を示す。

#### 細胞レベルの水分布の可視化

軟エックス線写真により、ケヤキとヤチダモでは心材に水が集積していることが可視化された(図2)。一方、ユーカリでは、基本的に辺材にも心材にも多量の水が存在しており、地上高の高い部分では、心材に低含水量の領域が円周方向に広がっている場合があることが示された(図2)。これらの結果は、(1)-で示された相対含水率や体積当たりの水分量の結果と一致するものである。

より詳細な細胞レベルの水分布は、軟エックス線写真の詳しい観察やクライオ走査電子顕微鏡で調べた。ケヤキとヤチダモでは、辺材では主に道管と柔細胞に水が存在し、木部繊維については、形成層付近を除けば、その多くが水を含んでいなかった。一方、心材ではほとんどの木部繊維が水で満たされており、柔細胞や一部の道管にも水の分布が見られた(図3)。これは、心材への移行直後と想定される心材の最外層においても同様であったが、内層に比べて、道管に水が分布している頻度は少なかった。ケヤキでは、心材外層の水分布が年輪の晩材側に偏っており、道管の水分布は晩材の小径道管に限られていた。

ユーカリでは、辺材でも心材でもほとんどの木部繊維と柔細胞が水で満たされていた。道管の水は辺材から心材に向けて失われていたが、心材の内層では、再び水を含んでいるものが見られた。(1)-でも示されたように、ユーカリの地上高の高い部分では、低含水量の領域が見られ、ここでは、ほとんどの道管、木部繊維、柔細胞から水が失われていた。ただし、道管周辺の木部繊維や柔細胞には水が残存していた。

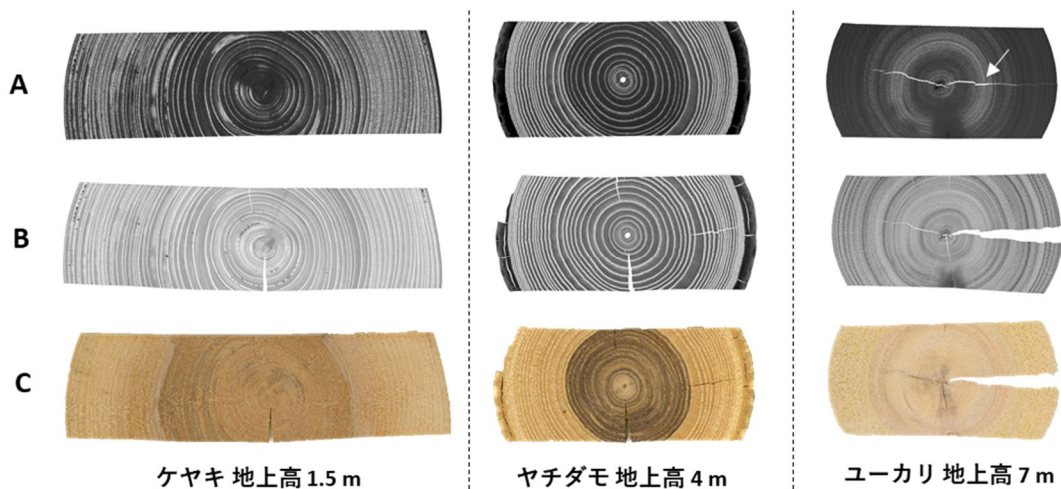


図2 軟エックス線写真で可視化したケヤキ、ヤチダモ、サリグナユーカリの樹幹内の水分分布。(A) 生材を凍結した状態で撮影した軟エックス線写真。(B) Aの試料を乾燥させてから撮影した軟エックス線写真。(C) Bの外観写真。BよりAで濃く写っている部分に水が集積していると判断される。白矢印：ユーカリの心材中にみられる低含水量の領域。

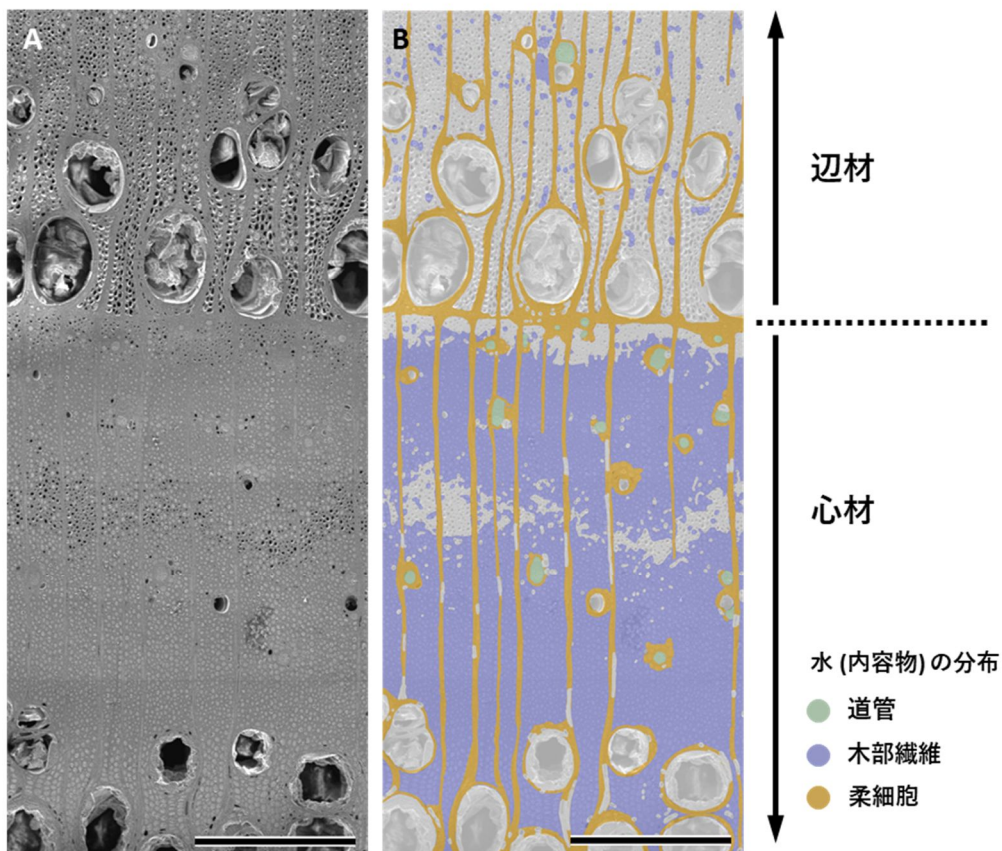


図3 クライオ走査電子顕微鏡で可視化したヤチダモの辺材・心材境界部における細胞レベルの水分布。(A) 木口面のクライオ走査電子顕微鏡像。(B) Aにおいて水が存在すると判断される領域に色を付けた図。スケールバー：500  $\mu\text{m}$ 。

以上の解析1の結果から、以下のことが明らかになった。

- ケヤキとヤチダモは、地上高に関係なく辺材よりも心材の水分量が多く、典型的な多湿心材をもつといえる。一方、ユーカリは全体的に高含水量で、多湿心材とみなせる領域が判別できない、地上高の高い部分ではむしろ含水量の低い心材をもつといった点から、多湿心材とは異なる水分特性をもつ樹種であると考えられる。
- ヤチダモとケヤキの多湿心材の外層では、木部繊維、柔細胞、一部の道管に水分分布が見られ

た。結論として、これらの水分分布がどのような順番で生じているのかを判断することは困難であったが、少なくとも道管を中心に水分分布が広がっているとは限らないことが分かった。一方、年輪内の水分分布の偏りから、少なくともケヤキでは、晩材側から水が流入していることが示唆された。

ユーカリの心材で見られた低含水部の水分分布から、ユーカリでは道管周辺の木部繊維は、それ以外の木部繊維よりも水を失いにくいことがわかった。類似した細胞であっても、内部構造や周囲の細胞との位置関係などによって、水の抜けやすさが違うことが示唆される。

## (解析 2) 多湿心材に関わる木材組織構造の解析

多湿心材をもつとの見解が示されている 11 樹種 (ニレ属、トネリコ属、トチノキ属、ハコヤナギ属、ユーカリ属、プラタナス属など) について、データベースの情報や既存のプレパラート標本を用いて木部組織の構造を観察した。その結果、共通性の高い特徴として、「木部繊維の壁孔の壁孔縁が狭いか単壁孔であること」(9 樹種が該当、ユーカリ属とプラタナス属が該当しない) と、「放射組織がすべて平伏細胞で構成されていること」(全樹種が該当) があげられた。また、必ずしも典型的とはいえないが心材が多湿化しやすいとされる樹種 (コナラ属、カバノキ属、カエデ属、ハナズオウ属) にも同様の傾向が見られた。これらの結果として示された共通特性のうち、木部繊維の壁孔 (細胞間をつなぐ細胞壁の穴) の特徴は、特に多湿心材の発生における水の流入に関わることが予想された。そこで、多湿心材をもつ可能性が高い 6 樹種 (ヤチダモ、ハルニレ、ケヤキ、トチノキ、ドロノキ、ヤマグワ) について、エタノール中に液浸保存されていた標本から試料を得て、木部繊維の壁孔の特徴を電界放出形走査電子顕微鏡で詳しく調べた。観察した 6 樹種のすべてに、壁孔内部に存在する隔壁状の構造に、高頻度で穴があいているという特徴が見られ、これが木部繊維への水の流入に関わる可能性がある。

一方、解析 1 のユーカリの結果で明らかになったように、既存の生材中の水分分布に関する知見のうち、生材含水率のみに基づいているものは、必ずしも実質的な水分分布を評価できていない可能性がある。既存の知見を相対含水率などで再検証し、さらにより多くの樹種で多湿心材の有無を調べたうえで、再度本解析を実施する必要がある。

### 【引用文献】

- 石田茂雄 (1955) トドマツ樹幹の凍裂の発生機構, とくにその水食い材との関係について. 北海道大学農学部演習林研究報告 22:273 - 373.
- 佐野雄三 (1996) 樹木の凍裂発生要因の研究. 北海道大学農学部邦文紀要, 19(8), 565 - 648.
- 矢沢亀吉 (1964) 樹幹内での含水率の分布. 北方林業 187:309 - 314.
- Ward, J.C. and Pong, W.Y. (1980) Wetwood in trees: a timber resource problem. USDA Forest Service General Technical Report 112.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山岸松平, 児嶋美穂, 黒田克史, 安部久, 鴨田重裕
2. 発表標題 ユーカリ・サリグナにおける木部繊維中の水分分布の可視化
3. 学会等名 第74回日本木材学会大会
4. 発表年 2024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
---------	---------