

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26450241

研究課題名(和文) 樹木樹幹放射方向の水移動における駆動力の解明

研究課題名(英文) Driving force of radial water movement in tree trunk

研究代表者

中田 了五 (Nakada, Ryogo)

国立研究開発法人森林総合研究所・林木育種センター北海道育種場・課長

研究者番号：60370847

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：樹木の生存戦略のひとつとして発達したと考えられ木材の利用上極めて重要な心材と、心材に水分が集積する現象で我が国の重要な林業樹種で大きな欠点となっているwetwood(水食い材・高含水率心材)について、それらの形成メカニズムを解明するために、樹木の樹幹の水ポテンシャルの日変動・季節変動に関わる関わりと考えられる、樹液流量・樹幹内温度勾配・樹幹含水率を高時間解像度で長期間連続的にモニタリングした。1成長期にわたる通年観測に成功し、データを蓄積するとともに測定法の技術的な基盤を確立することができた。今後、供試個体数の増加、対象樹種の範囲の拡大、データ解析の高度化により研究を発展させる必要がある。

研究成果の概要(英文)：Heartwood development is an unique phenomenon to trees and important for the life of trees and for wood utilization by human. Wetwood is a phenomenon of water accumulation into heartwood causing problems in wood drying. To understand the mechanism of the formation of heartwood and wetwood, in this study we developed methods to monitor the sap flow, temperature gradient and water content of tree trunks, which related to the diurnal and seasonal fluctuations of the water potential of the tree trunks. We achieved a technical basis of the long-term monitoring of the water status in tree trunks to cover one growth period continuously with a high time-resolution. Further studies are necessary to develop advanced analyses of the data with extending the number of measured trees of various species.

研究分野：木材解剖学

キーワード：植物生理 樹液流 材質 心材 水分生理 木材組織構造

## 1. 研究開始当初の背景

樹木の樹幹の木部の横断面を観察すると、樹幹周辺部の淡色の辺材と中央部の濃色の心材の二つの部分を見分けることができる。辺材は生細胞を含んでおり、根から葉への水分通道と物質貯蔵の機能を担っている。全ての心材は樹木の加齢と直径成長に伴って辺材が「心材化」することにより形成されたものである。心材形成に伴って辺材で生きていた細胞が死を迎えると同時に「心材成分」と呼ばれる心材に特異的な成分が形成されるが、心材成分の存在により心材は辺材より耐腐朽性が高く辺材より色が濃くなることが多い。心材形成は、樹木にとっては水分通道と物質貯蔵という機能を捨てて心材の機能を樹体の支持に特化するための現象であると考えられるが、木材の利用を考える上では心材形成によって木材に付与される天然の耐久性と美しい心材色は極めて重要である。

針葉樹の多くでは、心材形成に先立ってそれまで辺材では水分通道を行っていた仮道管の内腔から水分が失われ、心材の水分量は少なくなる。しかし、スギやトドマツなど一部の樹種の一部の個体では、心材の完成とほぼ同時に、一度水分が失われた仮道管内腔に水分が再侵入して心材に水分が集積する現象である wetwood (水食い材、高含水率心材) が起きる場合がある。通常水分量が少ないと期待される心材における wetwood の発達は木材の乾燥にとって大きな欠点となる。

これまでの研究によって筆者らは、心材と辺材の間に樹幹内放射方向の水ポテンシャル勾配が存在し、その勾配が季節によって逆転するという現象を発見した。このことは、季節によって辺材から心材への水分の放射方向の駆動力が存在していること、その駆動力によって水の放射方向移動が起こりうることを意味し、wetwood の形成メカニズムの解明につながると考えられた。また、この水ポテンシャル勾配とその季節変化は、wetwood がしばしば出現するスギとほとんど認められないカラマツで傾向が異なっていた。心材形成においては wetwood の出現とは別に常に樹幹の水分状態の変化が生じており、辺材と心材の水ポテンシャル勾配とその季節的变化は心材形成メカニズムの解明にも寄与するものと考えられた。

## 2. 研究の目的

辺材と心材の水ポテンシャルを測定するための筆者らのこれまでの研究では、成長錐によって樹幹から破壊的に採取した試料のサイクロメーター法による全水ポテンシャルの測定を行ってきた。この方法による季節性の検討は、1ヶ月に1度程度の間隔での供試で、同一個体からは数回から10回程度のサンプリングができるのみであった。

近年様々な測定機器および手法の発達により、非破壊的に高い時間解像度で樹幹の水分の状態や水分の動きを測定することが可

能となってきた。そこで本研究では、心材形成と wetwood 形成のメカニズムの解明を最終的な目的とし、辺材と心材の水ポテンシャル勾配とその変化が生じる過程を詳細に観察するために、樹幹内の水の状態と動きを非破壊で連続的にモニタリングする手法の開発を行った。

樹幹内水分状態として、辺材の水ポテンシャルの大きな変動要因と考えられる樹液流量、水ポテンシャル差を生じさせる原因となりうる樹幹内放射方向での温度勾配、樹幹に含まれる水の量としての樹幹含水率、を測定対象とした。

植物体内における水ポテンシャルは、圧ポテンシャル・浸透ポテンシャル・マトリックポテンシャル・重力ポテンシャルの4つの成分に分解できる。このうち樹幹内放射方向の水ポテンシャル勾配を考察する上では、マトリックポテンシャルと重力ポテンシャルには辺材と心材に差はないか極めて小さいと考えられる。浸透ポテンシャルは変わりうるが短時間にそれほど劇的な変化があるとは考えにくい。一方、圧ポテンシャルは蒸散に伴う樹液流動によって大きな日変化と季節変化が容易に想像できる。そこで、新しい測定機器・手法によって高い時間解像度で季節を通した樹液流量のモニタリングを行うこととした。

水ポテンシャルは、測定対象の水の部分モル体積、純水に対する測定対象の蒸気圧の比、気体定数、絶対温度から純水を基準とした熱力学的なエネルギー量として定義される。気温の日変化と季節変化にตอบสนองして樹幹の温度も変化するが、樹幹外側に位置する辺材と樹幹内部に存在する心材では外気温に対する応答は当然異なると考えられる。辺材と心材の水ポテンシャルの差とその変化を考察する上で、樹幹内温度勾配とその変化を把握する必要があると考えた。

樹幹の水分状態の基礎情報として水分量、すなわち樹幹含水率の把握をおこなうこととした。これまでの針葉樹の樹幹含水率の季節変化の調査例からは季節変化は小さいと考えられているが、相当量変化する例も報告されている。また、大きく日変化する樹液流量に伴って樹幹含水率も変化する可能性がある。植物学に関連して水分状態の日変化や季節変化の把握が求められているものとして土壌をあげることができるが、近年誘電を利用した土壌水分測定器がめざましく発展して広く利用されている。本研究では土壌水分計を流用して樹幹含水率の高時間解像度の長期測定を図ることとした。

本研究では、樹液流量・樹幹内温度勾配・樹幹含水率という樹幹内の水分移動に関わる三つの因子を高時間解像度で長期間連続的にモニタリングして基礎データを収集し、辺材と心材の間に観測される水ポテンシャル勾配とその季節変化を引き起こす要因を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1)材料

スギとカラマツを主たる研究対象樹種とした。両種は心材の性質（特に wetwood）や水分通道に関わると考えられる木材解剖学的な様々な形質の差が大きい。樹液流量については、カラマツは落葉樹であり落葉期間は樹液流量がゼロであると考えられる。両種は日本を代表する林業樹種であり、筆者の所属機関において育種実行のために遺伝的履歴の明らかな多数の遺伝的系統を保存しており、これらを供試木として研究に利用することが可能である。樹幹含水率についてはトドマツを加え3樹種を対象とした。すべての測定は北海道江別市の森林総合研究所林木育種センター北海道育種場構内の人工林で行った。供試個体数と樹齢と胸高直径は2016年末で、スギ2個体54年32および34cm、カラマツ2個体28年26および29cm、トドマツ1個体29年18cmであった。

#### (2)樹液流量

樹液流量のモニタリングのために、ゼロフロー（樹液流動がない状態）を定量的に決定できることと樹液流の逆流（樹幹上部から下部への流動）を観察できることを特徴とする Heat Field Deformation (HFD) 法を採用した。本研究で利用した ICT International 社製 HFD8 は1本のヒーターと3本のプローブと本体から構成されており、長さ97mmのプローブにはそれぞれ10mm間隔で8つのサーミスタが内蔵されており、これによって8点の放射方向の樹液流量の変異を観測できる。スギとカラマツを供試して10分間隔の測定を成長期を通して継続した。

#### (3)樹幹内温度勾配

樹幹内温度勾配については、研究計画時は専用機器の開発を含めて計画したが、HFD8の導入後同機器がヒーターを切って温度計として使用可能なことが判明したため流用することとした。よって、上述のとおり放射方向に10mm間隔での樹幹温度の測定が可能であった。樹幹内温度勾配は樹液流量測定を行っていないときに季節を変えて断続的に、10分間隔で数日間継続する測定を行なってデータを収集した。

#### (4)樹幹含水率

樹幹含水率のモニタリングのために、近年著しい発達を遂げている誘電土壌水分計を採用した。本研究に利用した Decagon Devices 社製 GS-3 は、長さ55mmの針状のプローブ3本と小型の本体から構成されているが、プローブと同径の穴を樹幹に開けて10分間隔での測定を季節を通して継続的に実施した。個体内・個体間での差を検討するために、個体あたり複数箇所での測定を複数個体で実施した。また、種間差をさらに詳しく検討する目的でトドマツを供試樹種として加えた。

### 4. 研究成果

#### (1)樹液流量

図1にカラマツでの2016年のほぼ1成長期をとした辺材全体の樹液流量 (sup flux density,  $\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{h}$ ) 変化を示す。2016年は、4月18日に葉芽の開芽を確認し、11月2日から14日の間に樹冠全体がほぼ黄葉した。研究開始当初は機器内蔵のバッテリーからの電源供給のみで運用しており短期間の測定しかできなかったものの、太陽電池パネルとバッテリーの導入により、ほぼ1成長期を通して連続測定が可能となった。図1で空白になっている箇所は、樹幹内温度勾配測定を行った期間、バッテリーから観測器への電源ケーブルが動物の食害により切断された期間、連続した悪天候によるバッテリー上がりの期間である。降積雪と低温による機器の損傷を危惧して、冬季は樹液流量の測定を原則行わなかった。

複数の新規知見が得られた。図1で見られるとおり、時々マイナスの樹液流量、すなわち樹幹上部から下部への樹液の逆流が起っていた。降雨中はカラマツでもスギでも樹液流がほとんどなくなるが、降雨後はカラマツの方がスギより速やかな樹液流量の回復を示した。8点の計測点があるので放射方向の樹液流量分布がわかるが、季節によって分布パターンが変化する場合があった。

問題点として以下の2点があった。測定機器の温度測定精度に若干の問題があり、補正が必要と考えられる。HFD法による樹液流量計算に必要なパラメータ「k-value」は測定されたデータから求めているが、k-value算出のための期間の設定で値が変化し、通年データからの算出にもまた問題があり、通年での連続観測を行う際のデータ解析方法を高度化する必要がある。

#### (2) 樹幹内温度勾配

図2にカラマツとスギの夏季の樹幹内温度勾配の変化を示す。両種とも樹幹内方にむかって外気温の上昇に対する追従が遅れるが、カラマツは2cmから4cm（プローブの樹幹外側端からの温度計の距離）にかけての遅れが距離に対して比例しているがそれより奥の温度はほぼ同調していたのに対し、スギでは距離と温度のずれが樹幹内方まで比例していた。なお、カラマツでは3.1cm、スギでは5.8cmが辺材と心材の境界に相当する。カラマツではスギに比べ心材内での温度勾配は比較的小さいと考えられた。

樹幹内温度勾配とその変化は水ポテンシャルへの温度の影響のモデリングの基礎情報となる。

#### (3)樹幹含水率

図3にカラマツ2個体計5箇所、スギ2個体計3箇所、トドマツ1個体1箇所についての2016年の樹幹含水率（体積含水率 volumetric water content (VWC),  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ）の変化を示す（同じ色は同じ個体）。樹幹含水率の変化としては、設置直後の大きな減少、日周性、冬季の減少と不安定な変化、降雨中とその後しばらくの急激な増加または減少、

長期間に渡る変化、の5種類が観察された。

図3のスギ2(オレンジ)とトドマツ(黄)の6月で認められるように、設置時に樹幹に穴を開けたことに起因する含水率の減少が観察された。日周性の大部分は、水の誘電率の温度依存性で説明できた。冬季の水分減少は、樹幹内の水の凍結による誘電率の変化によるものであることがわかった。降雨時の急激な変化は降雨に伴うノイズであると考えられた。たとえば、カラマツ1(黒)では、6月までは降雨後に樹幹含水率が急激に減少していたのが6月以降は急激に上昇するようになった。この現象について、6月(図中の縦黒線)にデータロガーに地中温度計を接続したため接地が取られた状態になって変化が起こったと解釈した。長期的にわたる変化は実際の樹幹含水率変化を表していると考えられ、スギ1(赤)の2箇所測定で異なった変化が観察されたこと、トドマツ(黄)では明らかな WWC の上昇が認められたことなど新規の知見が得られた。

樹幹含水率は1年をとおして供試木に測定機器を装着して測定を続けることができた。

#### (4)まとめ

3年間の研究期間の成果として、樹液流量・樹幹内温度勾配・樹幹含水率を高い時間解像度で長期間連続的に測定する手法の技術的基盤を確立することができた。

時間解像度は10分とした。たとえば1分などより高い時間解像度とすることも可能であるが、日周性を確認する目的とデータ量の関係から10分程度とするのが適切であると考えている。

測定は樹幹に小径の穴を開けて行う必要があったが、非破壊的に同一個体の同一部位で連続的に行うことが可能であった。非破壊での測定が可能であることは、さまざまな木材の性質の個体内や個体間での変動が大きい樹木での測定のアプローチとして優れている。

機器の測定精度や電氣的ノイズと思われる現象などいくつかの問題点はあるものの、3年間の研究によりデータが蓄積され多くの知見が得られた。今後データ解析を進めることにより問題点を解消する必要がある。さらに、測定対象個体や対象樹種を増やして樹幹の水分状態とその変化の個体間・種間多様性を解明する必要がある。

本研究により技術的な基盤を構築した樹幹の水分状態のモニタリングについて、今後のデータ集積と他の手法を組み合わせたデータ解析により、wetwood と心材形成のメカニズムの研究を推進したいと考えている。

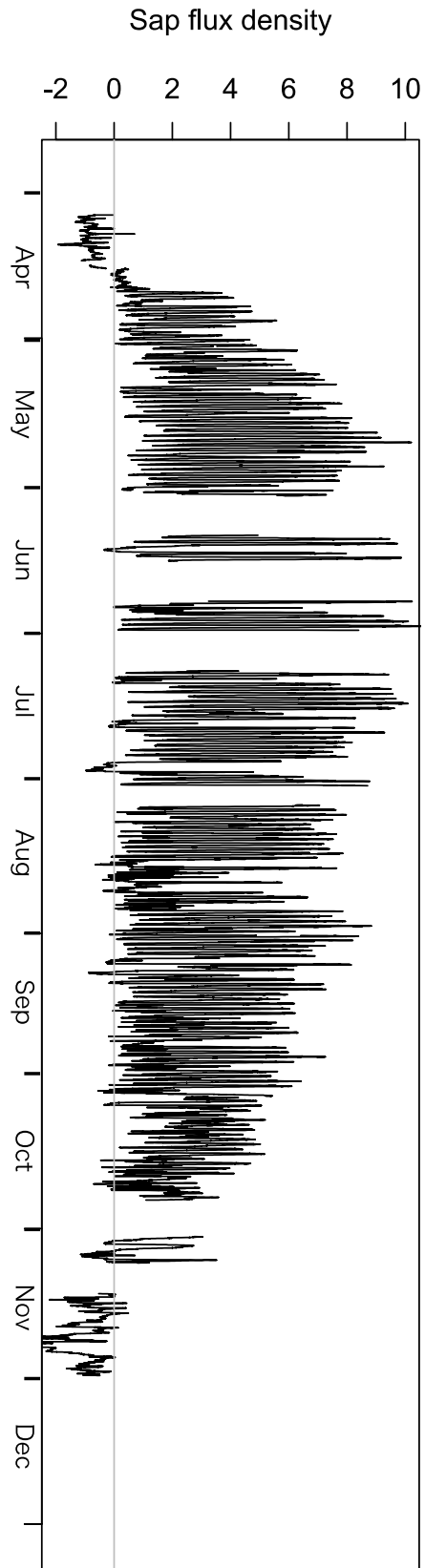


図1 カラマツの辺材における樹液流量(sap flux density,  $\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{h}$ )の変化。2016年4-11月。

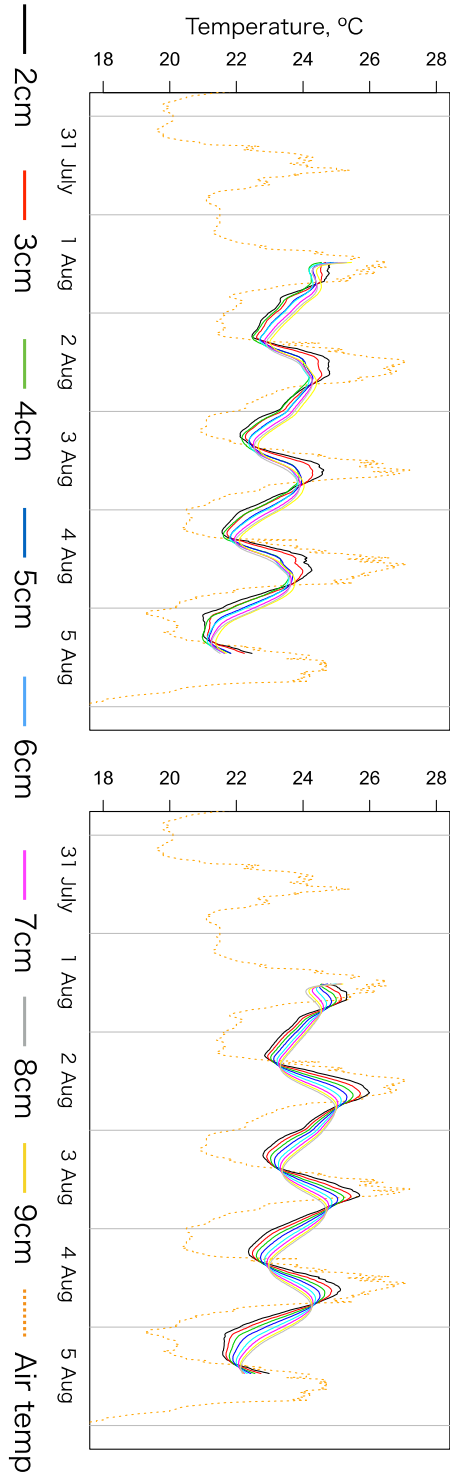


図2 カラマツとスギの樹幹内温度の変化。線の色の違いは放射方向での位置の違いを表す。オレンジの点線は外気温。2016年8月1-5日。

Larch, summer

Sugi, summer

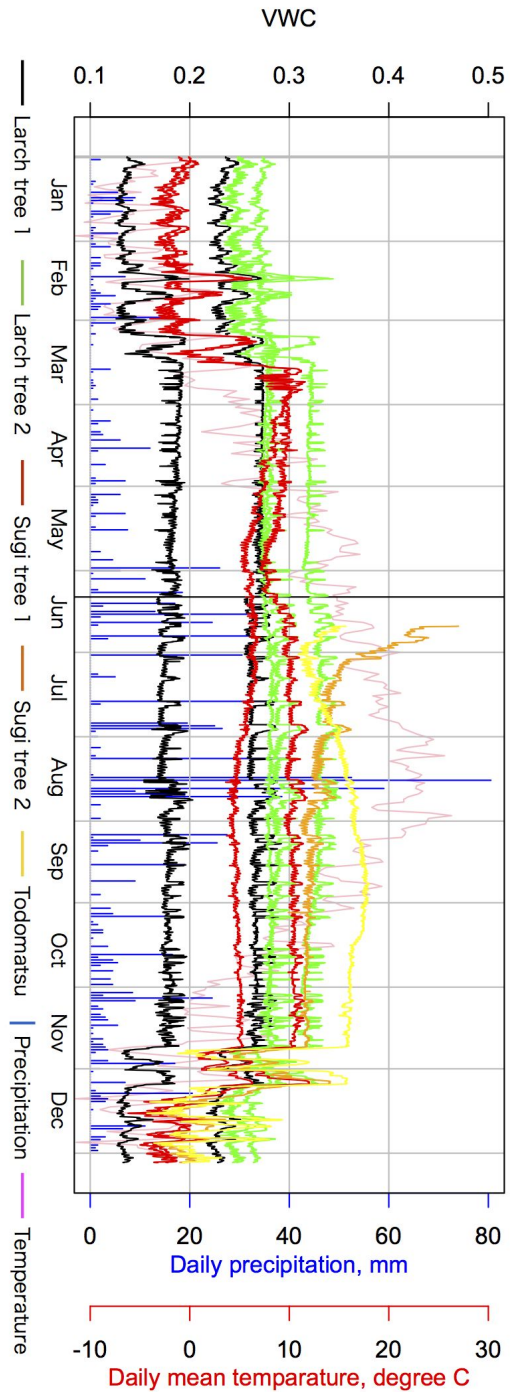


図3 カラマツ(黒と緑)、スギ(赤とオレンジ)、トドマツ(黄色)における樹幹含水率(体積含水率 VWC,  $m^3/m^3$ )の変化。ピンクと青は近傍のアメダスによる日平均気温と日降水量。2016年1-12月。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

- 1) Satoshi NAKABA, Hikaru MORIMOTO, Izumi ARAKAWA, Yusuke YAMAGISHI, Ryogo NAKADA, Ryo FUNADA: Responses of ray parenchyma cells to wounding differ between earlywood and latewood in the sapwood of *Cryptomeria japonica*. *Trees* 31 27-39 (2017) 査読あり
- 2) Satoshi NAKABA, Izumi ARAKAWA, Hikaru MORIMOTO, Ryogo NAKADA, Nobumasa BITO, Takanori IMAI, Ryo FUNADA: Agatharesinol biosynthesis-related changes of ray parenchyma in sapwood sticks of *Cryptomeria japonica* during cell death. *Planta* 243 1225-1236 (2016) 査読あり
- 3) 河西 優衣、尾頭 信昌、中田了五、今井 貴規: 蛍光顕微鏡法によるカラマツ心材成分の組織内分布の可視化。木材学会誌 61 297-307 (2015) 査読あり

[学会発表](計13件)

- 1) 中田了五: HFD法による樹液流量の長期連続測定。第67回日本木材学会大会、2017年3月17~19日、九州大学(福岡県福岡市)
- 2) 奥田 梨沙子、中田了五、今井 貴規: カラマツ心材成分の二次変化(重合)と心材色特性の発現との関連性。第67回日本木材学会大会、2017年3月17~19日、九州大学(福岡県福岡市)
- 3) 半 智史、高田 直樹、高橋 大輔、中田了五、上村 松生、船田 良: ドロノキ放射柔細胞の細胞死に関連するプロテアーゼの遺伝子発現解析。第67回日本木材学会大会、2017年3月17~19日、九州大学(福岡県福岡市)
- 4) Ryogo NAKADA: Characterizing *Abies sachalinensis* among plantation species in Japan. *Abies* 2016 The 15th International Conference on Ecology and Silviculture of Fir, 2016年9月21日~24日、北海道大学(北海道札幌市)
- 5) 中田了五: 心材成分ができるとき-心材形成を巡る謎と新しいアプローチ-。日本木材学会組織と材質研究会抽出成分利用研究会合同シンポジウム、2016年3月29日、名古屋大学(愛知県名古屋市)
- 6) 中田了五: 針葉樹生立木樹幹含水率の連続モニタリング(第2報)。第66回日本木材学会大会、2016年3月27日~29日、名古屋大学(愛知県名古屋市)
- 7) 奥田 梨沙子、河西 優衣、中田了五、今井 貴規: カラマツ心材形成に伴う抽出成分の堆積様式の季節変化。第66回日本木材学会大会、2016年3月27日~29日、名古屋大学(愛知県名古屋市)
- 8) 半 智史、高橋 大輔、梅澤 泰史、春日 純、高田 直樹、中田了五、上村 松生、船田 良: ドロノキ木部放射柔細胞の放射方向におけ

るタンパク質変動のショットガンプロテオーム解析。第66回日本木材学会大会、2016年3月27日~29日、名古屋大学(愛知県名古屋市)

9) 中田了五: 針葉樹生立木樹幹含水率の連続モニタリング。第65回日本木材学会大会、2015年3月17日~18日、タワーホール船堀(東京都江戸川区)

10) 半 智史、荒川 泉、森本 光、中田了五、尾頭 信昌、今井 貴規、船田 良: スギ木部放射柔細胞を用いた二次代謝を伴う細胞死誘導系における細胞内容物の経時変化。第65回日本木材学会大会、2015年3月17日~18日、タワーホール船堀(東京都江戸川区)

11) 河西 優衣、佐藤 良勝、半 智史、中田了五、今井 貴規: カラマツ心材成分の堆積に関する組織化学的研究。第65回日本木材学会大会、2015年3月17日~18日、タワーホール船堀(東京都江戸川区)

12) Izumi ARAKAWA, Hikaru MORIMOTO, Ryogo NAKADA, Ryo FUNADA, Satoshi NAKABA: Morphological change and disappearance of nuclei in ray parenchyma cells during heartwood formation in *Cryptomeria japonica*. IAWPS 2015 International Symposium on Wood Science and Technology, 2015年3月16日~17日、タワーホール船堀(東京都江戸川区)

13) Izumi ARAKAWA, Hikaru MORIMOTO, Ryogo NAKADA, Ryo FUNADA, Satoshi NAKABA: Changes in cellular content of ray parenchyma cells during heartwood formation in *Cryptomeria japonica*. 6th International Symposium of Indonesian Wood Research Society, 2014年11月12~13日, Garuda Plaza Hotel (Medan, Indonesia)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

中田 了五 (NAKADA, Ryogo)

国立研究開発法人 森林総合研究所・林木育種センター北海道育種場・課長

研究者番号: 60370847