

令和 6 年 7 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K05702

研究課題名（和文）機械学習で導き出したスギ横断面における全組織の形状と位置、その応用

研究課題名（英文）Shape and location of wood cell on cross section of Japanese cedar predicated by machine learning

研究代表者

堀 成人（Hori, Naruhito）

東京大学・大学院農学生命科学研究科（農学部）・助教

研究者番号：80313071

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：本課題の目的は機械学習MLを新機軸とし、木材組織学におけるこれまでにない発見の探索にある。その前半部はスギ横断面で観察できる組織の画像認識法を確立することにある。既往の研究では年輪幅を横断面の数箇所を測定し、その平均値などで評価しているが、本検討ではMLによる画像識別を用いて年輪界を検出し、より詳細な年輪幅を得られる方法を開発することにある。そのための解析プログラムを作製し研究の基盤として整備した。申請書図3に示したように、年輪画像を極座標系から直交座標系へ変換することでMLでの取り扱いが容易になり、帯状の年輪を  $\sin(x)^n$  で表される多項式で表現することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

MLが実用化されてから日は浅いが、その技術は瞬く間に社会基盤となった。木質科学の領域に目を向けると機械学習を取り入れた研究は少なく、加えて内容も分類・予測の確度を高めることに重きが置かれている。ML自体の研究は、さまざまな要求に対応できるように計算アルゴリズムを洗練させることにある。そしてMLによる分類・予測は産業の分野で大きな期待が寄せられている。しかし本来MLにおいて最も重要なのは学習成果にある。学習をさせたMLがどのような理由でそのように分類・予測したのかを抽出し、そこから人間には導けなかった原因を発見する点に学術的な意義がある。ここに本課題の目標を位置づける。

研究成果の概要（英文）：The objective of this project is to explore unprecedented discoveries in wood histology using machine learning (ML) as a new approach. The first part aims to establish an image recognition method for the tissue observed in cross-sections of Japanese cedar (sugi). Previous studies have evaluated annual ring widths by measuring several locations on the cross-section and averaging these values. However, this study aims to develop a method to detect annual ring boundaries using ML-based image recognition, allowing for a more detailed measurement of annual ring widths. To achieve this, an analysis program was developed and established as the foundation of the research. As shown in Figure 3 of the application, transforming the annual ring images from polar coordinates to Cartesian coordinates makes it easier to handle them with ML. This transformation allowed us to successfully represent the strip-shaped annual rings with a polynomial expressed as  $\sin(x)^n$ .

研究分野：木材科学

キーワード：年輪気象学 組織形状 画像解析 機械学習

### 1. 研究開始当初の背景

MLとビッグデータの組み合わせはAIの活用という旗印の下で社会を大きく変えつつある。この組み合わせは複雑系に立ち向かう強力なツールとなった。

MLを取り入れた研究が木質科学の分野でも始まっている。その手法は大きく分けて2つ、分類と予測がある。分類における主題は木材の等級分けにあり、もう一つは実測した含水率などを基にした力学特性の予測にある。それら研究では結果の確度を上げる学習方法の試行錯誤に主眼が置かれており、MLが計算機科学で発展してきた経緯に引っ張られている。試料にしても従来型の多変量解析で対応できる数量で、ビッグデータには程遠い。最も大きな問題は新しい知見の探索に挑んだ研究が一つもない点にある。

### 2. 研究の目的

本課題の目的はMLが獲得した学習成果に注目し、そこから木材組織学における発見を導くことにある。

前半は、共焦点レーザー顕微鏡とイメージスキャナで撮影したスギ横断面の高解像度画像から仮道管などの組織すべてを認識し、その形状と位置をデータベースに記録する方法を確立する。5本の木材試料での解析を行い、全体としてスギがどのような組織構造を持つのかMLに提示させる。これは木材の設計図となる。このことにより組織レベルの形状から木材レベルの形(ミクロからマクロ)まで余すことなく連続的に繋げることとなり、組織学の知見で木材の強度を語る、逆に強度から組織構造を推定するといった学問へ発展させる土壌を作る。後半では設計図を作ったノウハウを活かし、年輪気象学の精密化と、乾燥過程で生じる組織の変化を追跡し、これまでにない発見に取り組む。

(1) [独自性] 半径10cmの横断面に見える組織の数は少なくとも数十億にのぼる。その組織ひとつひとつの顕微鏡画像と位置をそのまま記録するのは現実的ではない(数10テラバイト以上になる)。その巨大容量が障壁となり、組織から木材までを連続して繋げようとする考えは起こらなかった。この限界を突破するために右にあるボロノイ図を導入する。組織の形状はボロノイ境界線で区分けされた領域へ近似し、その領域内にある母点一つだけで定義する。各境界線の内側に沿う壁厚を記録する。こうすれば木材組織の形状と位置のデータをコンパクトにでき、計算機科学で取り扱える大きさになる。

(2) [創造性] MLは自律的に学習を進める過程で、人間には見つけづらい、ある現象を発現させるのに潜んでいる複数個からなる因子のからみ合いを見つけ出す。たとえば年輪気象学に沿ったアプローチとして、早材/晩材比が例年より特異に高い年の気象条件はという問いに対して、春に雨量が30%多く、夏は25°Cに届かない日が10日続き、秋の訪れが15日遅い年というように統計的で精密な結果をMLは提示できる。学習成果を基にして、予想ができない結論を導くのがMLの真骨頂であり、「MLで検討する」は無責任で安易な言葉とはならない。むしろ学習成果から木質科学での新しい作業仮説を発見する点に、本課題の創造性を求める。

### 3. 研究の方法

観察は共焦点レーザー顕微鏡と高解像度イメージスキャナで行い、どの実験においても気乾したスギ横断面を対象とする。MLの環境は次の通り：ディープラーニングによる機械学習、学習方法に畳み込みニューラルネットワーク、事前学習あり、教師あり、Google TensorFlowを解析ライブラリ、プログラミング言語にPythonとC++を併用。

#### 1. 組織の画像認識法の確立

MLは画像を受け取り、組織の形状を切りだして分類する。ここでは共焦点レーザー顕微鏡で撮影した横断面の画像から、木材組織(主に早材晩材の仮道管、放射柔組織、壁孔室)を識別するML画像認識法を確立する。形状には大まかな規則性が提案されており、その例として仮道管は六角形ないし四角形で、早晩材の区別はMorkの定義<sup>1</sup>が挙げられる。それら基本情報をMLにあらかじめ入力してスタートアップを図る。MLが正確な判断を下すには入力データの数が重要である。5本の木材において、1本あたり100カ所で撮影した画像を使用する。そこに含まれる組織は数十万となりビッグデータとしては十分である。得られる認識法はこの後の基盤技術となる。認識の学習成果を抽出・評価して、次のサブテーマを検討する。

(1) 佐伯らが示した早材から晩材への細胞壁率の推移<sup>2</sup>を詳細に算定。

(2) 組織形状および早材晩材の識別について、MLの分類能力を活かして新しい規則性を導出。

## 2. 組織の形状と位置

スギ横断面上にどのような組織がどこにあるのか、その全てを ML で認識し位置を記録するのが本検討の目的である。観察はイメージスキャナで行い、画像の取り込み面に対して横断面を少しずつ動かして撮影していき、端が重なり合うようタイル状につなげて 1 枚の画像とする。組織形状の切り出しは 1. で確立した画像認識法を用い、それをボロノイ図で表す。得られた母点と壁厚のデータは観察面を網羅し再現性もあることから、いわば横断面の設計図である。木材試料 1 本 1 本から作成した設計図をもう一度 ML で推論させ、一般化したスギ横断面の設計図はこれだと提示させる。数値データは計算機から使いやすい形であり、この後の精密な解析への道が拓ける。設計図を基に年生を変数として、たとえば早／晩材比、壁厚、組織の放射方向と接線方向での長さ比など特性値を得てこれまでの知見を発展させる。

## 3. ML を用いた年輪気象学

気象は樹木の生長に大きな影響を与えるが、個別の要素、たとえば気温や雨量のみで評価するのは困難とされている。そこで本検討では、ML が得意とする、現象を引き起こす複数の因子の絡み合いを発見する能力に注目し、年輪の生長に影響をあたえる気象条件を探索する。これと同時に既にある知見の検証も行う。気象データは気象庁のウェブサイトからダウンロードする。既往の研究では年輪幅を横断面の数カ所を測定し、その平均値などで評価しているが、本検討では ML による画像識別を用いて年輪界を検出し、より詳細な年輪幅を得られる方法を開発する。

## 4. 年輪気象学を組織レベルへ精密化

上述 3. は年輪単位での検討だが、本節では 2. の手法を用い、年輪気象学を組織単位へ掘り下げる。ある特定の温度域で生育した仮道管の直径は大きいといったように、特定の気象条件により組織形成に差違が生まれる。またスギ仮道管の成長サイクルは約 3 週間とされている<sup>3</sup>。これら知見と 2. の解析方法、そして気象データを組み合わせ、数週間程度の間隔での気象特性と、その間に生長した組織の形状とを一致させて年輪気象学をより精密にする。

## 5. 乾燥による組織形状と位置の変化

乾燥による木材の収縮は異方性を持つが、その原因については様々な説が提唱されている。石丸が挙げている 4 説のいずれもが組織形状と位置の変化に起因する<sup>4</sup>。厚さ 2cm 程度の横断面試料において伐採後から気乾、そして全乾にいたるまで段階的に組織の形状と位置の変化を上述 2. の方法を用いて追跡し、その変化が乾燥で受ける影響を明らかにする。ここから木材の乾燥に関する新たな作業仮説を導く。この検討で重要なのは 2. が木材を部分的ではなく全体で評価している点で、従来からなされてきた組織断片をひとつひとつ観察する方法よりも広い視野からの論議ができる。

## 4. 研究成果

本課題の目的は機械学習 (Machine Learning, 以降 ML) を新機軸とし、木材組織学におけるこれまでにない発見の探索にある。その前半部はスギ横断面で観察できる組織の画像認識法を確立することであり、初年度はその足がかりをつけた。画像認識における ML の具体的な環境は次の通りである: ディープラーニングによる機械学習、画像の識別・学習方法に畳み込みニューラルネットワーク、事前学習あり、前処理段階では教師あり、numpy および Google TensorFlow を解析ライブラリ、プログラミング言語に Python と C++ を併用した。木材横断面の画像取得は高解像度スキャナで行うとともに、インターネットにある画像も著作権に注意を払いながら利用した。既往の研究では年輪幅を横断面の数カ所を測定し、その平均値などで評価しているが、本検討では ML による画像識別を用いて年輪界を検出し、より詳細な年輪幅を得られる方法を開発することにある。そのための解析プログラムを作製し研究の基盤として整備した。申請書図 3 に示したように、年輪画像を極座標系から直交座標系へ変換することで ML での取り扱いが容易になり、帯状の年輪を  $\sum a_n(x)^n$  で表される多項式で表現することに成功した。そしてその多項式で複数の木材横断面の画像を解析し、機械学習で最適化できることを示した。その際に、過学習に至らないよう中心に近い年輪の関数を重要視し、より外側の関数の次元を小さくするよう検討した。なお、極座標系から直交座標系に変換するにあたり、座標系の中心 (髄) に行くほど画素が少なくなり情報が疎になるが、周りの画素から勾配を利用して予測し、画素を補完する方法を採った。

次からは年輪幅の求め方を実例を用いて説明する。

20 年生のスギ材の断面画像を高解像度スキャナを用いて取得する。この画像は直交座標系なので放射方向への極座標系に展開する (図 1)。

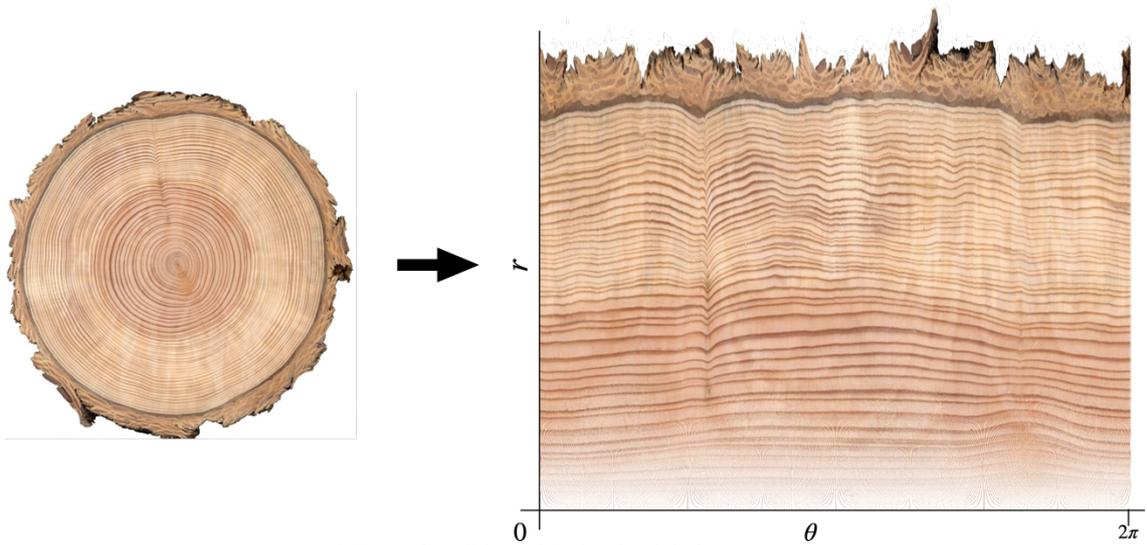


図1 木材断面画像を極座標系への変換

図1のように得られた極座標系の画像を放射方向にスライスし、グレイ、レッド、イエローの画像に変換してどの色が年輪を識別するのに適しているか可視化する(図2)。レッドおよびイエローの画像では髓付近(図の左側)の情報が減衰しているのに対し、グレイはその傾向が見られなかった。従ってグレイの画像で検討を進めた。

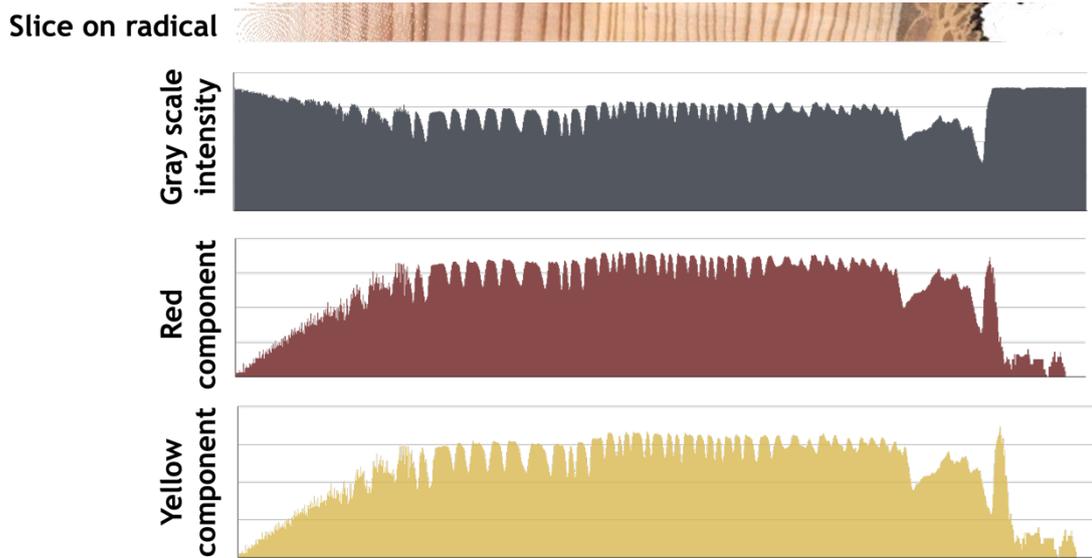


図2 年輪を識別する色の選別

さらに検討を進め、グレイ画像の頂点を結び折れ線グラフを作成する。この折れ線の一次微分をとり、これも線グラフとする。このグラフの微視的な頂点が年輪界となる。図3。  
(次ページに続く)

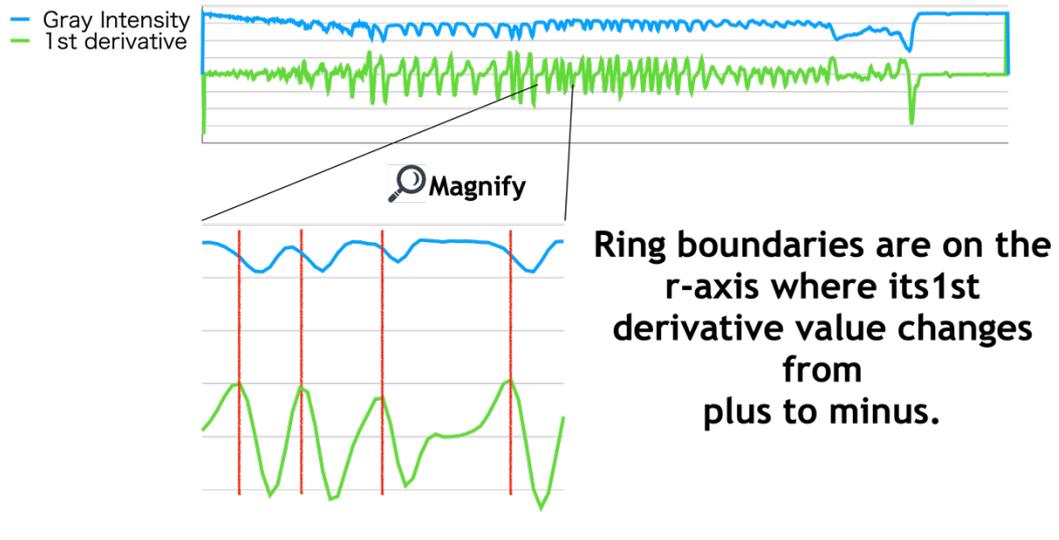


図3 グレイ画像から折れ線グラフの作成、一次微分、その頂点を年輪界とする

上記の方法で画像解析、可視化した年輪界は図4のようになる。

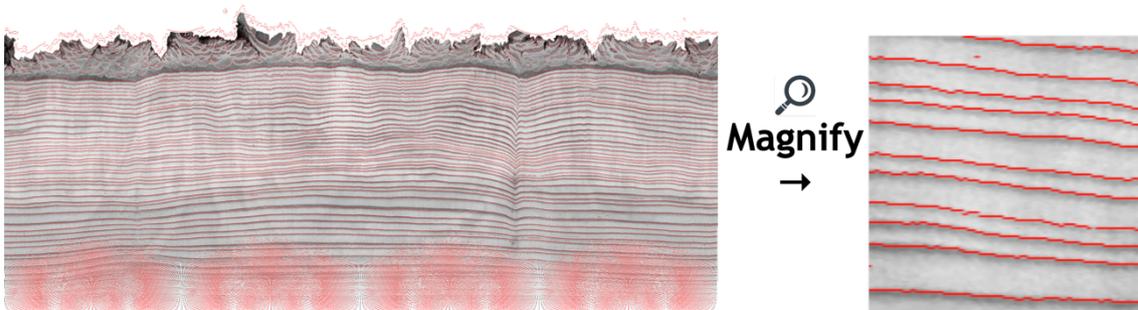


図4 画像解析で可視化した年輪界

このように画像として可視化した結果は年輪界についていろいろな検討に用いることができる。図5では年輪幅を可視化したもので、明るい色ほど年輪幅が広く、逆に暗い色だと狭い。通説だと表層に行くほど年輪幅が短いとされるが、一様には言い切れないことを見いだした。

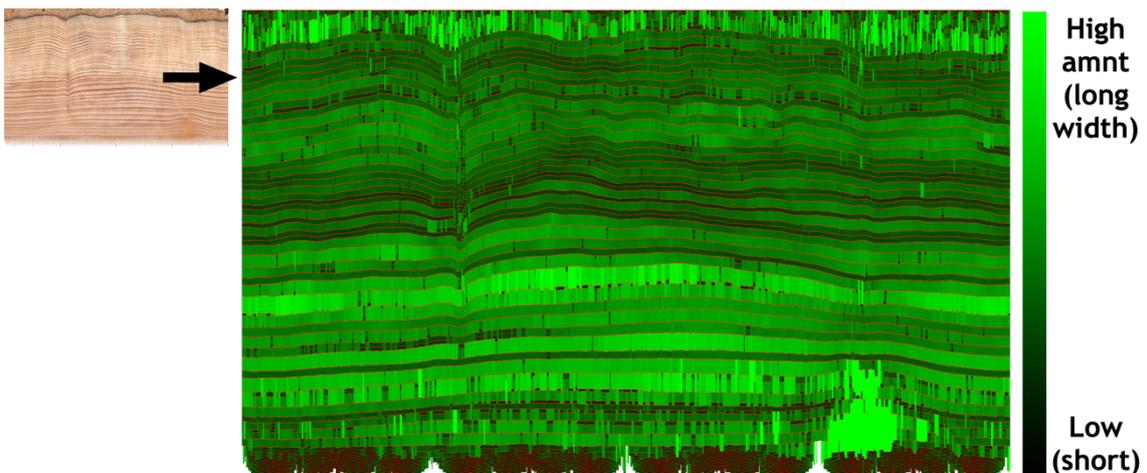


図5 年輪幅の可視化

<引用文献>

1. Mork, E.: Nyt. Mag. Naturvid, **64**, p234 (1926)
2. 原田浩、木材の構造、p168-172、文永堂出版 (1985)
3. M. Fujita et al.: Bull. Kyoto Univ. Forest., **59**, p248-257 (1987)
4. 日本木材学会編、木質の物理, p61, 文永堂出版 (2007)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
研究分担者	竹村 彰夫  (Takemura Akio)  (50183455)	東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・教授   (12601)	
研究分担者	山口 哲生  (Yamaguchi Tetsuo)  (20466783)	東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・准教授   (12601)	

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