

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25292102

研究課題名(和文) NIR-HSI法を活用した木材のハイスループット型材質分析手法の確立

研究課題名(英文) Construction of high-throughput type wood property analytical methodology using NIR-HIS technique

研究代表者

土川 覚 (Tsuchikawa, Satoru)

名古屋大学・生命農学研究科・教授

研究者番号：30227417

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：デジタル画像の各ピクセルに格納された分光スペクトルを多変量解析して所望の物質情報を可視化するハイパースペクトラルイメージング法(HSI法)を近赤外領域で展開し、木材の材質を総合的に判断するこれまでにないハイスループット型非破壊計測手法(NIR-HIS法)の確立を目指した。木材密度、含水率、ヤング係数、あて材およびマイクロフィブリル傾角の材内変動の可視化および針葉樹材と広葉樹材の自動判別が可能となった。

研究成果の概要(英文)：This research quantified the spatial distribution of moisture content, density, Young's modulus, compression wood section, and microfibril angle within *Cryptomeria japonica* and *Larix kaempferi* branches using near-infrared hyperspectral imaging (NIR-HIS) and multivariate data analysis techniques. The calibration models for prediction of moisture content, density, Young's modulus and microfibril angle were developed using partial least squares (PLS) regression analysis. The PLS model for these traits showed good predictive performance. The high density compression wood could be visualized with NIR-HIS technique. Classification of softwoods and hardwoods also enabled by principal component analysis. The results presented here provide useful information for development of a novel wood sorting method.

研究分野：木質科学

キーワード：非破壊計測 可視化 応用分光学 含水率 密度 マイクロフィブリル傾角 ヤング係数 多変量解析

## 1. 研究開始当初の背景

近赤外 (NIR) 分光法は、波長 800-2500nm の近赤外領域における拡散反射、または透過スペクトルを測定することによって、有機物質の諸特性を分析する手法である。木材を対象とした近赤外分光計測に関する研究は、この 10 年間に長足の進歩を遂げ、水分、セルロース、リグニン含量の推定にとどまらず、木材密度やマイクロフィブリル傾角等の物性値やヤング率等の機械的特性が高精度で推定可能となることが明らかになった。

一方、デジタル画像の各ピクセルに分光スペクトルが格納されたデータを解析する手法であるハイパースペクトラルイメージング法 (HSI 法) を活用した研究が活発に行われており、農産物や食肉の分光画像から対象物表面全体の成分分布検出や欠点検査が行えることが報告されている。近赤外分光分析と画像解析の併用は、試料に関する重畳的な波長分解情報・空間分解情報を我々に提供する。

本研究は、NIR-HSI 法とも呼ぶべき新しいツールを活用した新規木材材質評価手法の確立を目指すものである。建築・工業材料としての木材のあり方を考えた場合、樹幹内部位によって特徴的に変動する材質を迅速、簡便そして高分解能で非破壊的に捉えて、一度に大量のデータを解析する「ハイスループット型」技術を確立することが、安心・安全な天然構造材料としてこれを社会に供給し需要の拡大を目指す上でもますます重要な事柄になる。例えば、①密度、②ヤング係数、③成熟材部と未成熟材、④あて材等は製材品の強度性能に大きな影響を及ぼすため、これらの材内変動状況をできる限り測定面全体にわたって把握することが望ましい。また、割れや狂いを抑制して適切な乾燥処理を施すことが、木材工業では絶対的に要求される。木材の乾燥現象は非常に複雑であるから、木材内の局所的な水分の情報のみではその実態を正しく把握することは難しい。とくに、自由水と結合水をそれぞれ分離して画像モニタリングすることができれば、その利得はきわめて大きい。

上記のように、NIR-HSI 法を用いると、従来のスペクトル解析をそのまま面情報に展開でき、材質測定や水分モニタリングが試料全面にわたって実現可能となる。

## 2. 研究の目的

以上のことを踏まえて本研究では、NIR-HSI 法による①木材密度、ヤング係数、あて材、マイクロフィブリル傾角の材内変動の画像化、および②木材の乾燥過程における水分の移動の画像化、③針葉樹材と広葉樹材の自動判別を試み、これらの画像情報に立脚して木質材料の材質を総合的に判断するこれまでにないハイスループット型非破壊計測手法の確立を目指した。

## 3. 研究の方法

### (1) 計測システムの最適設計

近赤外領域対応ハイパースペクトラルイメージングカメラ、および光源を主たる構成要素とする計測システムを設計した。本研究で測定対象とする木材の寸法は、20cm×10cm 程度の板材や直径 30cm 程度の木口面円板であり、また、含水率も生材状態から気乾状態まで幅広い。そのため、試料寸法や水分状況に応じて適切な画像取り込み環境を設定する必要がある。具体的には、①試料寸法に応じた視野幅の設定、②測定面の水分状況に影響を与えない光源の選択が挙げられる。

### (2) NIR-HSI 測定による画像化アルゴリズム構築の基礎的要件の洗い出し

多波長の分光画像によって各種材質の定量・定性分析を高精度で行うためには、画素間の連関を考慮した新規判別アルゴリズムの開発が必要となる。本研究ではその端緒として、気乾材を対象とする密度分布の画像化を試みる。あらかじめ密度を計測したスギ材あるいはカラマツ材の NIR-HSI 測定を行い、その後、定法に基づいて密度を計測する。スペクトル処理法、平均スペクトルを抽出する画素数を変化させ、もっとも高い精度で密度を推定できる条件を探索した。

### (3) 各材質の画像化アルゴリズム構築

主成分回帰分析、Partial Least Square (PLS) 回帰分析等の多変量解析を行い、各材質に関する最適検量線を作成した。さらに、判別アルゴリズムを NIR-HSI データに適用することによって、各材質の分布を可視化した。

## 4. 研究成果

### (1) スギ材の水分分布の可視化

鳥取大学農学部教育研究林蒜山の森に生育するスギ 8 個体を選木し、伐倒後、速やかに各原木から厚さ約 30 mm の円板を採取した。円板表面をクロスカットソーで平滑化し、NIR-HSI 測定を行った。測定条件は、測定波長領域が 913-2519 nm (6.34 nm 間隔)、画像サイズが縦 571 pixel×横 320 pixel×波長 256 pixel、空間分解能が縦 0.32 mm×横 0.48 mm/pixel とした。スペクトル画像測定後、円板を 20 mm 格子の小ブロックに分割し、含水率および容積密度数の実測値を得た。HSI データから各ブロック位置に対応するピクセルの反射率スペクトルを抜き出し、SNV 処理 (測定によるばらつきを除去できる標準正規変量処理) 後、1 ブロックにつき 1 つの平均スペクトルを算出した。平均スペクトルと実測値を用いて PLS 法により含水率の検量線を作成した。得られた検量線に基づき推定含水率を元の円板画像上に可視化し、円板内での変動・分布を評価した。

ブロックサンプル (総数 318 個) より得た含水率の実測値は、27%から 210%の変異幅があった (平均値: 86%、標準偏差: 42.3%)。PLS 回帰分析の結果、良好な推定モデルが得られた ( $R^2 = 0.87$ 、推定誤差 = 15%)。得ら

れた検量モデルに基づいた含水率の推定値を元の円板画像上に可視化した結果を図1に示す。図から明らかなように心材・辺材の含水率差が明瞭に確認できた。

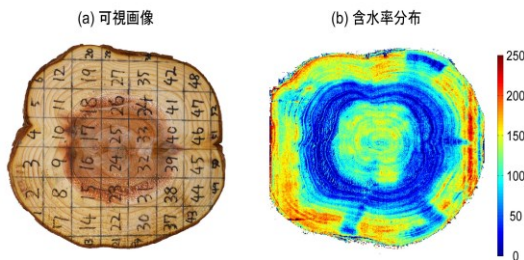


図1 NIR-HSI法によるスギ材の含水率推定値マッピング

### (2) スギ材の密度分布の可視化

上記と同様な手法でスギ材木口面円板のハイパースペクトラル画像を再度取込み、含水率、密度に関する検量線を同時に作成することを試みた。それぞれの決定係数は、0.82 および 0.84 となり、高精度で両者の推定が可能となることが示唆された。マッピングの結果、心材近傍の白線帯が低含水率状態にあることが確認できた(図2)。また、同法によって、圧縮材部を明確に可視化することができた。

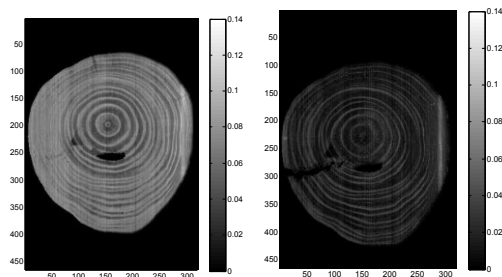


図2 白線帯を含むスギ材の含水率推定値マッピング  
(左図: 含水率 14.4%、右図: 含水率 4.5%)

### (3) カラマツ材のヤング係数分布の可視化

北海道産カラマツ 30 本から断面寸法 88 × 25 mm の挽き板を 181 枚製材した。各挽き板の先端約 25 mm を切断し、NIR-HSI 測定を行った。残りの挽き板から縦振動法を用いてヤング係数の実測値を測定した。その後、挽き板に相当する領域の平均スペクトルと、対応する実測値を用いて PLS 回帰分析を行い、検量モデルを作成した。次いで、新たに採取したカラマツ円板のハイパースペクトルに作成した検量線を当てはめ、得られた推定値を疑似カラーによって可視化した。

実測値の平均値は 9.85GPa、標準偏差は 2.86 GPa であり、4.93GPa から 19.50GPa までの変動幅があった。PLS 回帰分析の結果は主成分数が 6、決定係数が 0.50、推定誤差が 1.20GPa であった。可視化した画像から、早材と晩材の違いなど、円板内の材質分布を把握することができた。さらに、得られたデー

タの活用例の1つとして、挽き板の寸法に相当する領域を抽出し平均化することで、製材後の挽き板の材質を推定することができた(図3)。

以上より、材質分布を考慮した新たな丸太選別方法として HSI 法の有効性が示唆された。

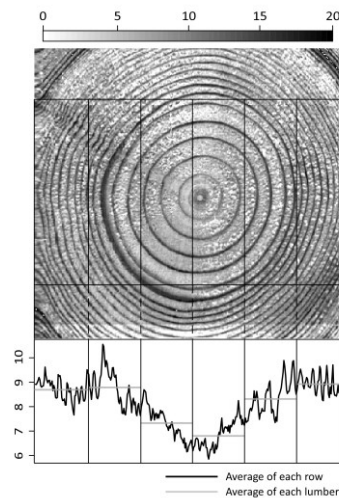


図3 カラマツ材ヤング率の推定値マッピング

### (4) 針葉樹・広葉樹判別の可能性

材質を総合的に判断する手法の確立を最終目的として、本法による針葉樹材と広葉樹材の自動判別を試みた。針葉樹(スギ、ヒノキ、ヘムロック、スプルース、ベイマツ)と広葉樹(ブナ、ケヤキ、クリ、ミズナラ、ヤマザクラ)の板材を複数枚準備した、NIR-HSI 測定を行った。得られたスペクトルに対して、SNV 処理および 2 次微分処理を行い、主成分分析による針葉樹と広葉樹の判別可能性を検討した。

針葉樹と広葉樹では、ヘミセルロースの構成糖が異なるため、それと関連する 1173nm、1791nm 前後に吸収の違いが現れた。ハイパーキューブから該当する領域(1134nm-1185nm と 1677nm-1841nm)を抽出し、判別分析を行った(図3)。第 1 主成分スコアから第 3 主成分スコアまでの 3 枚画像を RGB 画像(R:PC1、G:PC2、B:PC3)として表示すると、針葉樹と広葉樹の違いが明瞭となった。

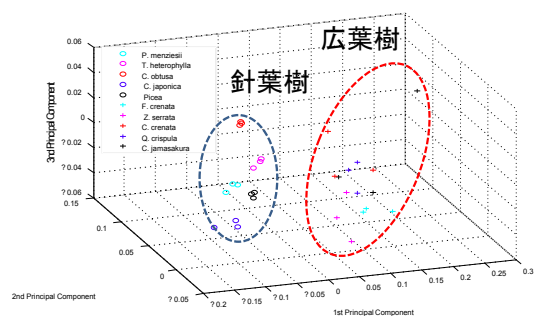


図4 主成分スコア(平均値)の三次元プロット

(5) スギ材乾燥過程および密度・マイクロファイブリル傾角分布の可視化

スギ材を対象として、含水率分布の可視化および予測した含水率の誤差について検討した。材料を自然乾燥させながら、NIR-HSI測定を所定の時間間隔で行った。さらに、予測誤差を評価するため、サンプル、バックグラウンドおよびダークの測定を複数回行った。得られた3次元のハイパーデータに対して、各画素の反射率を求めた。木材化学構成成分に関連する波長の選択および吸収バンドを明確化する2次微分などの前処理を行い、PLS回帰分析による含水率予測を試みた。さらに、誤差の伝搬式を用いて、含水率測定誤差の評価を試みた。試料全面にわたって水分分布の経時変化を捉えることができるとともに、適切な誤差評価方法の必要性が示唆された。

スギ材正常部とあて材部試料をカナダのFPInnovationsに送付し、同社が保有するSilviScan(X線デンストメータと同じ原理で材質を連続測定する装置)によって密度およびマイクロファイブリル傾角を連続測定した。これらを実測値とみなしてNIR-HIS法によって予測を試みたところ、いずれの物性値も高精度推定が可能となった。

#### 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 Fujimoto T., Numa T., Kobori H., Tsuchikawa S., “Application of near infrared hyperspectral imaging for mapping of moisture content and wood density in sugi (*Cryptomeria Japonica*)”, *Proceeding of the 4<sup>th</sup> Asian NIR symposium*, 査読無, **1**, 2014, 231-232.

② Fujimoto T., Numa T., Kobori H., Tsuchikawa S., “Visualization of spatial distribution of moisture content and basic density using a near-infrared hyperspectral imaging method in sugi (*Cryptomeria Japonica*)”, *International Wood Products Journal*, 査読有, **6**, 2015, 46-48.

③ Inagaki T., Katsuya Mitsui, Tsuchikawa S., “Visualisation of degree of acetylation in beechwood by near infrared hyperspectral imaging”, *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 査読有, **23**, 2015, 353-360.

[学会発表] (計8件)

① 土川 覚, 「NIR-HIS法による原木横断面内の木材性質変動の可視化」、第64回日本木材学会大会、2014年3月13日-15日、愛媛大学(愛媛県・松山市)

② Satoru Tsuchikawa, “Application of near infrared hyperspectral imaging for mapping of moisture content and wood density in sugi (*Cryptomeria Japonica*)”, *The 4<sup>th</sup> Asian NIR symposium*, 2014年6月17-20日、Daegu(Korea)

③ 土川 覚, 「ハイパースペクトラルイメージングによる木材化学成分の可視化」、日本木材加工技術協会第32回年次大会、2014年10月29-30日、秋田ヴェューホテル(秋田県・秋田市)

④ 土川 覚, 「近赤外ハイパースペクトラルイメージングによる木材化学成分の同定」、第30回記念近赤外フォーラム、2014年11月26-28日、つくば大学国際会議室(茨城県・つくば市)

⑤ Satoru Tsuchikawa, “Evaluation of chemical composition in wood using NIR hyperspectral imaging”, *IAWPS2015*, 2015年3月15-17日、Tokyo(Japan)

⑥ 土川 覚, 「近赤外ハイパースペクトラルイメージング法による原木横断面内材質の評価」、日本木材学会中国・四国支部第27回(2015年度)研究発表会、2015年9月28-29日、久世エスパスランド(岡山県・真庭市)

⑦ 土川 覚, 「NIR-HIS法による木材アセチル化の可視化」、第31回近赤外フォーラム、2015年11月26-27日、つくば大学国際会議室(茨城県・つくば市)

⑧ 土川 覚, 「ハイパースペクトラルイメージング法による木材性質分布の評価」、第31回近赤外フォーラム、2015年11月26-27日、つくば大学国際会議室(茨城県・つくば市)

[その他]

ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

土川 覚 (Tsuchikawa Satoru)

名古屋大学大学院・生命農学研究科・教授  
研究者番号: 30227417

(2) 研究分担者

山本 浩之 (Yamamoto Hiroyuki)

名古屋大学大学院・生命農学研究科・教授  
研究者番号: 50210555

藤本 高明 (Fujimoto Takaaki)

鳥取大学・農学部・准教授

研究者番号: 40446331

稲垣 哲也 (Inagaki Tetsuya)

名古屋大学大学院・生命農学研究科・助教

研究者番号: 70612878

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: