

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H03015

研究課題名(和文) コグニティブスペクトロスコピーによる自動樹種判別システムの構築

研究課題名(英文) Construction of Classification System of Wood Species by Cognitive Spectroscopy

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) 11,810,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、「多層構造のニューラルネットワークを用いた機械学習であるディープラーニングを木材の可視・近赤外シームレスハイパースペクトラルデータに適用して、木材の樹種判別を自動で行えるプロトコルを構築し、コグニティブスペクトロスコピーともいべき新たな認識科学分析手法を確立すること」を目標とした。

広葉樹38樹種の可視画像および近赤外ハイパースペクトラル画像をもとに、CNNを用いて樹種判別を行ったところ、近赤外画像を用いた場合の正答率は90.5%に達した。これにより「試料表面の分子振動情報とその空間分布をCNNによって分析する」という新たな認識化学分析手法の可能性を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本手法によって近赤外領域・可視領域両方での木材樹種判別の可能性を示した。顕微鏡写真からのバッチ抽出およびトレインデータ・テストデータの選択方法によって樹種判別の推定精度が大きく異なることが明らかとなった。以上一連の研究によって本手法の木材樹種判別への有効性および限界を確認した。また提案手法を様々な農産物評価にも応用し、その有用性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research, "Deep learning, which is machine learning using a multi-layered neural network, was applied to visible/near-infrared seamless hyperspectral data of wood, and a protocol that can automatically discriminate wood species is constructed and cognitive. The goal is to establish a new cognitive science analysis method that can be called a spectroscopic copy."

When tree species were discriminated using CNN based on visible images and near-infrared hyperspectral images of 38 hardwood species, the correct answer rate when using near-infrared images reached 90.5%. This made it possible to show the possibility of a new cognitive chemical analysis method of "analyzing molecular vibration information on the sample surface and its spatial distribution by CNN".

研究分野：木質科学

キーワード：近赤外分光法 ハイパースペクトラル画像 CNN 認識科学分析手法

## 1. 研究開始当初の背景

近年、違法に伐採される木材やそれらから製造される建材・家具・工芸品等の流通が世界的な問題となっており、各国はその対策のための制度導入を検討している。木材の樹種および原産国の表示の義務化が有効な対策の一つであると認識され、主に先進国において法令化が進んでいる。わが国においても林野庁が中心となって合法性証明制度、グリーン購入法など、環境に配慮した木材利用が推進されるとともに、(一社)木材表示推進協議会が、木材や木質製品の樹種および原産国表示推進の取り組みを行っている。木材樹種の正確な識別は考古学的な研究においても重要性を増している。科学的手法による樹種識別は、木質文化財の修復において有効な情報となるだけではなく、古の日本人の木材に対する観念を未来へ正しく伝達することにも繋がる。もっとも基本的かつ確実な樹種識別法は、木材切片の顕微鏡観察による解剖学的分析である。識別の手がかりとなる特徴的な組織構造を見つけ出し、それを基に樹種を絞り込んでいく。木材の解剖学的な特徴は国際木材解剖学者連合 (International Association of Wood Anatomists: IAWA) によってコード化されており、これを参照にした識別データベースが各国の研究機関で作成・公表され、オンライン利用が可能となっているが、あくまでも目視による画像認識を前提としたものであるから、時間と熟練を要する地道な作業である。その他にも、化学成分分析による識別(ケモタキソノミー: 化学分類法)やDNA分析による識別が研究されているが、顕微鏡観察に匹敵するほどの正確さで簡易かつ迅速に実施しうる手法は確立されていなかった。代表研究者らは、可視・近赤外分光法の非破壊センシング性に着目した基礎・応用研究を行っており、その一環として、樹種判別や古材を対象とする研究を行っていた(例えば、Kobori et. al., J. Near Infrared Spectroscopy, 2017、Inagaki et. al., J. Wood Sci., 2018)。国内外の研究者も同法の有用性に着目して、木質文化財や取引禁止木材の樹種判別分析に取り組んでいる(例えば、安部ら、木材保存、2015、Dawson-Andoh et. al., Wood Sci. Tech., 2012)。実際の手順は、木材成分そのものの抽出や単離、分析といった化学的に複雑な分析を行わずに、吸収スペクトルのデータベースを構築し、グループごとの相違を調べるケモメトリクスと呼ばれる多変量解析に依拠している。実用性が高く、高精度判別も可能であるが、「ケモメトリクスというブラックボックス(要するに、なぜ判別できるのかを明確に説明しにくい)」の利用が一般化を阻んでいるのも事実である。1)物質の吸収係数・散乱係数を正確に求めて定量・定性分析を行う、2)振動分光的に吸収ピークの帰属を徹底的に洗い出す、というのがオーソドックスな手法であるが、可視・近赤外領域は光散乱の影響がきわめて大きいので、相当難しい作業になる。そこで研究代表者らは、ケモメトリクスを援用して得られた結果の分光学的解釈が曖昧ならば、あえてこれを明瞭にするのではなく、「いっそのこと、多層構造のニューラルネットワークを用いた機械学習であるディープラーニングにより木材の化学情報と物理情報を統合・意味づけする」ことにより、試料情報の全貌を認識することを考えた。

## 2. 研究の目的

可視(電子励起)・近赤外(振動励起)スペクトルの形状そのものを情報源として活用し、コグニティブ(認識)スペクトロスコピーとも呼ぶべき新たな分析手法を構築し樹種判別を正確・迅速・簡便に行うことが、本研究の目的である。木材の可視・近赤外分光情報を包含したシームレスなハイパースペクトラルデータ(各ピクセルがスペクトルそのもの)を利用して、樹種判別を自動で行えるプロトコル構築を目指した。通常分光分析は、あくまでも振動分光に則って吸収バンドの帰属や吸収・反射強度の大小から目的とする物質の存在や多寡を探索する分析手法である。しかし、木材のように多数の有機物質から構成されかつ固有の組織構造を有する天然材料を測定対象とする場合には、得られたスペクトルには、「化学情報(成分比等)」と「物理情報(細胞壁構成や組織構造)」が混在しているので、純粋な分析化学としての活用に制限が加わってしまう。可視・近赤外分光法は、曖昧との誹りを受けやすいのでなおさらである。研究代表者らは、この点を逆手に取り、あえて正確な吸収係数・散乱係数や構成成分の振動分光的な厳密な帰属を求めずに、「可視・近赤外域の広帯域スペクトルがもつ微妙な形状・ニュアンスの変化を畳み込み処理して疑似RGB化し、ディープラーニングにより木材の化学情報と物理情報を統合・意味づけする」ことにより、樹種判別を正確・迅速・簡便に行うことを考えた。いわば「常識はずれの研究提案」であるが、木質科学に軸を置きつつも、可視・近赤外分光および画像解析を主たるツールとした計測科学を展開する研究者集団が当該課題に取り組むことにより、木質科学および分光学にブレークスルーをもたらす結果が得られると考えた。

## 3. 研究の方法

### 3-1 試料収集、ディープラーニング解析環境構築

ディープラーニングのモデル構築には、多数のデータセットが必要となる。当該研究では、ロバストなモデル作成が可能となる試料数を調達するため、国産材を中心として、広葉樹材50種、針葉樹材10種(各樹種とも数本の丸太から20-30試料、5cm×5cm程度、気乾材)を収集した。

GPU ディープラーニングワークステーションを新規購入し、解析環境を整備・構築した。なお、ライブラリ/フレームワークとしては、Python を用いた。また、Matlab toolbox による解析環境も整えた。

### 3 - 2 可視・近赤外ハイパースペクトラルイメージング(HSI)測定に関わる計測システムの最適設計

近赤外領域(1000-2400 nm)の HSI 測定装置(現有)によって木材試料を測定する環境を整備した。本研究で測定対象とする木材は 5cm×5cm 程度の板材であるが、樹種は多岐にわたるため、視野幅や光照射条件を適切に設定して HSI 測定装置で S/N 比の安定したデータ取得を実施することが重要であった。具体的には、レンズ部の光学設計・改造を稲垣が担当し、その性能評価を馬および非常勤職員が行った。視野幅を広げることによって画像が粗くなり判定精度が低下することが考えられるが、この場合には、単位時間当りに取り込む画像幅を細分化して両装置で測定精度を維持する等の改善を試みた。

### 3 - 3 可視画像による樹種判別

まず、可視 HSI で得られる各ピクセルの分光情報を積算して通常の可視画像を求め、ディープラーニングによって、自動樹種判別を試みた。ロバストなモデル作成のための画像サイズや解析因子(活性化関数・ネットワーク構成・学習率)を網羅的に探索し、最適モデルを確立した。とくに、入力層(元の画像)から出力層(樹種判別)に至る過程で、畳み込み層での輪郭・模様抽出とプール層での有効情報圧縮作業を交互に複数回繰り返して、「目視による樹種判別」のディープラーニング的な判別精度を見極めた。

### 3 - 4 可視・近赤外シームレス HSI による樹種判別

近赤外 HSI からの自動樹種判別を試みた。平均反射スペクトルに対して主成分分析を行い、ローディングと元の反射スペクトルから、PC1 を赤色画像(R)、PC2 を緑色画像(G)、PC3 を青色画像(B)に割り付けて疑似 RGB 画像を構築した。この画像群に対して、ディープラーニング演算を行い、自動樹種判別を試みた。

これらが当初計画以上に進行したため、同様の手法によって木材の強度特性あるいは植物種子の発芽、米の品種に関する推定も行った。

## 4. 研究成果

令和元年度には、訓練データの各画像を空間平均化したスペクトルを説明変数として主成分分析を行い、ローディングを算出した。算出したローディングを SNV スペクトル画像に適用して主成分スコア画像(PC 画像)を構築した。この画像に対して複数の層構造モデルに対して学習を行った後、検証データを用いてモデルの性能を検証することで最適層構造を決定した(解析には Intel®Xeon®2.30 GHz CPU および NVIDIA Tesla K80 GPU を搭載した Google Colaboratory を用いた)。最適と判断された学習済モデルの予測精度を評価するために評価データを用いて 5 回のテストを行い、予測正解率の平均値と標準偏差を算出した。その結果(下表)、広葉樹 38 樹種に対して高い正答率(90.5%)で樹種判別を行えることを示した。この成果を論文としてまとめ、海外雑誌に投稿・受理・掲載された(Analyst, 144, 6436-6446 (2019))。

表. 樹種判別正確度(NIR-HIS に CNN 適応して予測した)

Pretreatment and components <sup>a</sup>	Contribution <sup>b</sup> (%)	Accuracy <sup>c</sup> (%)
Visible (RGB)	—	56.0 (±2.6)
Raw (PC1)	86.9	32.3 (±2.2)
Raw (PC1-PC2)	98.7	59.2 (±1.3)
SNV(PC1)	76.4	48.8 (±2.0)
SNV(PC1-PC2)	86.5	71.3 (±1.4)
SNV(PC1-PC3)	91.1	84.8 (±1.3)
SNV(PC1-PC4)	94.4	84.0 (±2.1)
SNV(PC1-PC5)	96.1	86.9 (±1.1)
SNV(PC1-PC6)	97.4	90.5 (±1.2)

<sup>a</sup> Image type and number of principal components. <sup>b</sup> Cumulative contribution ratio of each principal component. <sup>c</sup> Average accuracy and standard deviation of 5 tests.

さらに日本産広葉樹の木口面顕微鏡写真から高精度で樹種判別を可能とするモデルの作成を試みた。この研究により、顕微鏡写真からのバッチ抽出およびトレインデータ・テストデータの選択方法によって樹種判別の推定精度が大きく異なることが明らかとなった。バッチ抽出の方法によっては、広葉樹 50 種（下表および図：各樹種で 20 枚の顕微鏡写真）において非常に高い精度で樹種を判別することも可能であった。

表. 顕微鏡写真からの樹種判別正確度

	Unit	test data	surplus test data
Divided dataset (set1)	patch	0.34	0.35
	image	0.50	0.54
Non-divided dataset (set2)	patch	0.63	0.40
	image	0.92	0.68

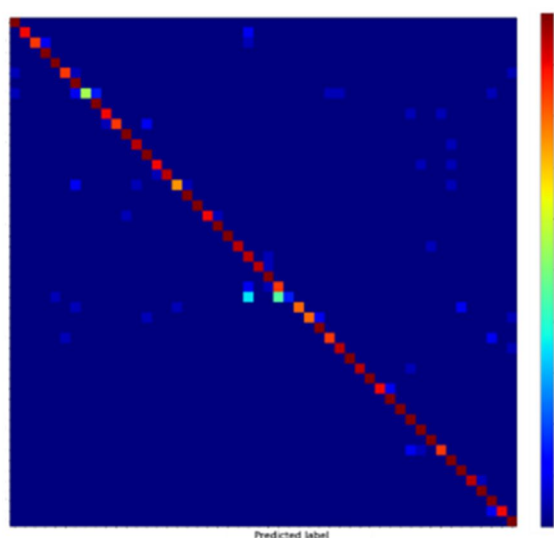


図. 樹種判別のコンフュージョンマトリックス

本手法によって近赤外領域・可視領域両方での木材樹種判別の可能性を示した。また、これまで発表された論文と比較して（個体識別ではなく）実用上重要である「実際の正答率」を導き出したことが大きな進捗であった。具体的には顕微鏡写真からのバッチ抽出およびトレインデータ・テストデータの選択方法によって樹種判別の推定精度が大きく異なることが明らかとなった。バッチ抽出の方法によっては、広葉樹 50 種（各樹種で 20 枚の顕微鏡写真）において 100%の精度で樹種を判別することも可能であった。また提案手法を様々な農産物評価にも応用した。本手法によってジャスミンライスと偽物を 95%以上の精度で推定できることを見出し論文発表を行うなど、この研究領域に関する論文を 9 報発表した。以上一連の研究によって本手法の木材樹種判別への有効性および限界を確認した。また大目標である「コグニティブスペクトロスコピーともいべき新たな認識科学分析手法を確立」に大きく前進したといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hideaki Kanayama, Te Ma, Tetsuya Inagaki, Satoru Tsuchikawa	4. 巻 144
2. 論文標題 Cognitive spectroscopy for wood species identification: near infrared hyperspectral imaging combined with convolutional neural networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Analyst	6. 最初と最後の頁 6436-6446
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9an01180c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ma Te, Tsuchikawa Satoru, Inagaki Tetsuya	4. 巻 177
2. 論文標題 Rapid and non-destructive seed viability prediction using near-infrared hyperspectral imaging coupled with a deep learning approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computers and Electronics in Agriculture	6. 最初と最後の頁 105683 ~ 105683
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compag.2020.105683	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ma Te, Xia Yu, Inagaki Tetsuya, Tsuchikawa Satoru	4. 巻 174
2. 論文標題 Non-destructive and fast method of mapping the distribution of the soluble solids content and pH in kiwifruit using object rotation near-infrared hyperspectral imaging approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Postharvest Biology and Technology	6. 最初と最後の頁 111440 ~ 111440
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.postharvbio.2020.111440	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ma Te, Xia Yu, Inagaki Tetsuya, Tsuchikawa Satoru	4. 巻 173
2. 論文標題 Rapid and nondestructive evaluation of soluble solids content (SSC) and firmness in apple using Vis/NIR spatially resolved spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Postharvest Biology and Technology	6. 最初と最後の頁 111417 ~ 111417
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.postharvbio.2020.111417	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Onmankhong Jiraporn, Ma Te, Inagaki Tetsuya, Sirisomboon Panmanas, Tsuchikawa Satoru	4. 巻 123
2. 論文標題 Cognitive spectroscopy for the classification of rice varieties: A comparison of machine learning and deep learning approaches in analysing long-wave near-infrared hyperspectral images of brown and milled samples	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Infrared Physics & Technology	6. 最初と最後の頁 104100 ~ 104100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.infrared.2022.104100	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ma Te, Inagaki Tetsuya, Yoshida Masato, Ichino Mayumi, Tsuchikawa Satoru	4. 巻 28
2. 論文標題 Measuring the tensile strain of wood by visible and near-infrared spatially resolved spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cellulose	6. 最初と最後の頁 10787 ~ 10801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10570-021-04239-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Viet Dang Duc, Ma Te, Inagaki Tetsuya, Kim Nguyen Tu, Tsuchikawa Satoru	4. 巻 75
2. 論文標題 Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging can aid in the prediction and mapping of polyploid acacia hybrid wood properties in tree improvement programs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Holzforschung	6. 最初と最後の頁 1067 ~ 1080
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/hf-2021-0024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ma Te, Morita Genki, Inagaki Tetsuya, Tsuchikawa Satoru	4. 巻 29
2. 論文標題 Moisture transport dynamics in wood during drying studied by long-wave near-infrared hyperspectral imaging	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cellulose	6. 最初と最後の頁 133 ~ 145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10570-021-04290-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 稲垣哲也, 高橋華子, 金山英誠, 土川 覚
2. 発表標題 NIR-HSI の DL 認識 コマツナ種子の発芽評価
3. 学会等名 第35回近赤外フォーラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬 特、稲垣哲也、土川 覚
2. 発表標題 NIR-HSIのディープラーニング認識_コマツナ種子の発芽予測精度について
3. 学会等名 第36回近赤外フォーラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木村 文哉、馬 特、土川覚、稲垣哲也
2. 発表標題 ディープラーニング（深層学習）による日本産広葉樹の樹種判別
3. 学会等名 第71回日本木材学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 関 隼人, 村上温子、馬 特, 土川 覚, 稲垣哲也
2. 発表標題 近赤外分光イメージングによる白イチゴの糖度分布可視化
3. 学会等名 第37回近赤外フォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村 文哉、馬 特、土川覚、稲垣哲也
2. 発表標題 Deep learning approach of visible microscopic and NIR macroscopic image for wood species classification
3. 学会等名 The 20th International Conference on NIR (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Dang Duc Viet, Te Ma, Tetsuya Inagaki, Nguyen Tu Kim, Satoru Tsuchikawa
2. 発表標題 Identification of Acacia clones wood using Nearinfrared hyperspectral imaging and deep learning method
3. 学会等名 The 20th International Conference on NIR (国際学会)
4. 発表年 2021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
研究 分担者	稲垣 哲也  (Inagaki Tetsuya)  (70612878)	名古屋大学・生命農学研究科・准教授    (13901)	

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			
ベトナム	ベトナム林業研究所			
タイ	KMITL			
中国	Northwest A&F University			