

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22248020

研究課題名（和文） TOF-NIR デンシトメトリによる新奇木材材質計測手法の確立

研究課題名（英文） Construction of novel measurement method of wood property
by TOF-NIR densitometry

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

研究成果の概要（和文）：

本研究では、時間飛行近赤外 (TOF-NIR) デンシトメトリという新奇の分光学的手法を創出し、これに基づいた非破壊木材材質計測手法を確立することを目指した。ピコ秒オーダーの極短時間パルスレーザー光を木材に照射し、透過光の時間変動（時間プロフィール）を詳細に観察する計測システムを開発するとともに、透過光変動に及ぼす木材材質の影響を光拡散方程式の順問題および逆問題的解法によって記述し、得られた吸収係数・散乱係数等から各種材質を非破壊で推定することを試みた。また、木材に連続レーザー光（CW光）を照射し透過光量を測定する測定系も別途試作し、両者の測定結果を比較・検討することによって、近赤外レーザーによる木材材質測定の可能性を追究した。

一連の実験の結果、厚さ5mmまでの木材試料からの透過光の検出が可能となることがわかった。また、いずれの測定方法においても、早材部と晩材部で、密度に対応して透過光量が明瞭に変動した。CW光の照射スポット分解能に対応して、X線デンシトメータと同様の密度変化をとらえることができた。また、パルス光測定では、晩材部で透過光度のピーク値の減少およびピーク時間の遅れが確認できた。TOF-NIR法を用いて、木材の乾燥経過モニタリングを試みた。各乾燥段階によって、吸収・散乱係数は特徴的に変化し、これらは試料表層部および内部における水分の存在状況と密接に関わっていることが明らかになった。上記の結果に基づいて、透過光時間プロフィールを説明変数とする多変量解析を行い、含水率の推定を行った結果、従来の近赤外反射スペクトルを説明変数にした場合よりも高精度で含水率が予測できることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：

A new optical measurement system, the main components of which are a streak camera and semiconductor laser, was introduced to clarify the optical characteristics of wood from the viewpoint of time-of-flight near infrared (TOF-NIR) spectroscopy. Another system, which is composed of LED NIR laser (CW type) and photodetector, was also constructed. Intensity of transmitted light varied with early wood and late wood, which was due to the difference of density. The density and cellular structure directly affected the transmitted time-resolved profile. Absorption and scattering coefficient of wood were calculated from the variation of time-resolved profile based on the forward and backward model of light transportation equations. It was known that absorption and scattering coefficient of wood were varied with the moisture condition of subsurface layer and inside of the sample. Multivariate statistics as the explanatory variables of time-resolved profile showed high accurate estimation of moisture content of wood compared to that of traditional NIR spectroscopy.

The optical model based on the diffusion approximation to the radiative transfer equation proved to be useful for thick samples, which can be optically regarded as an ideal diffuser, although wood is a structural material with non-homogeneous cellular structure.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	16,100,000	4,830,000	20,930,000
2011年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2012年度	2,300,000	690,000	2,990,000
総計	20,600,000	6,180,000	26,780,000

研究分野：生物システム工学

科研費の分科・細目：森林圏科学・木質科学

キーワード：分光分析、時間飛行、木材、材質評価、近赤外、非破壊計測

1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは、近赤外分光法（NIR 分光法、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、有機物質の成分値を分析する手法）を木材の新しい非破壊定量・定性分析法として適用することを試み、一連の基礎実験を行ってきた。本法は、国内においては、農業・食品・製薬・化学工業等の分野で活用されることが多いが、欧米・豪州等では上記分野以外に木材産業にも導入されつつある。また、近赤外関連の木材研究論文も、ここ 10 年間で約 150 本以上発表されており、本法への注目度が急激に高まってきている。

ところで、通常分光計測ではインコヒーレントなタングステンハロゲンランプ等が光源として用いられるが、これをコヒーレントなレーザ光に変更すると、スポット径が 1mm 以下となるため、試料準微視的領域の材質情報計測手段としての新展開が期待される。とくに、ナノ秒、ピコ秒オーダーの極短時間パルスレーザ光を用いると、試料内におけるパルス光の時間的変動を光拡散方程式に基づいて読み解くことにより、物質内部の化学構成成分含量、組織構造等を明らかにすることができる。このように、レーザ光源および極短時間パルスの特性をいろいろな波長で活かすことができると、木材試料を対象とした場合にも各種材質を精細に捉えることができる、すなわち、既存の X 線デンストメータに匹敵する分解能で化学構成成分の含有量分布や密度、強度、マイクロフィブリル傾角等の変動状況を捉えることができるのではないかと考えるに至った。

2. 研究の目的

本研究では、時間飛行近赤外デンストメトリ（Time-of-flight Near Infrared Densitometry: TOF-NIR デンストメトリ）という新奇の分光学的手法を創出し、これによる非破壊木材材質計測手法の確立を目指して一連の基礎実験を行う。また、木材に連続レーザ光（CW 光）を照射し透過光量を測定する測定系も別途試作し、両者の測定結果を比較・検討することによって、近赤外レー

ザによる木材材質測定の可能性を追究した。本研究の具体的な目標は、

- ①ピコ秒（ 10^{-12} 秒）オーダーの超高速パルスレーザ光を木材に照射し、透過光の時間変動（時間プロフィール）を詳細に観察する計測システムを新たに開発する。
- ②透過光変動に及ぼす木材材質の影響を光拡散方程式に基づいて逆問題的に解くことを試み、これによって各種材質を非破壊で推定する。すなわち、化学構成成分の含有量分布、物理的・機械的情報を高精度で推定する。
- ③CWレーザ光照射位置を連続的に変化させて透過光を計測するシステムを構築し、木材密度変化の推定を試みる。

3. 研究の方法

数十ピコ秒オーダーの時間幅をもったパルス発振 NIR 半導体小型レーザ、超高速時間対応のストリークカメラおよび光学ベンチを主たる構成要素とする TOF-NIR 計測システムを設計・試作する。これまで実施された TOF 研究の成果に基づいて、測定手順を確立するとともに、透過光検出限界や時間応答特性についても検討する。また、CW 光を光源とする測定系を別途設計・試作し、NIR レーザによる木材材質推定の可能性を検討した。

スギ、カラマツ、ベイマツ、バルサ等を対象とした透過レーザ光測定実験を行う。測定後の木材試料密度を、X 線デンストメータを用いて測定する。TOF-NIR 法によって求められた透過光時間プロフィールの変動および CW 光による透過光連続測定値と X 線デンストメータから求められた密度分布を比較し、本法の測定性能について検討する。

透過パルス光の時間プロフィールおよび化学成分実測値に基づいて、時間プロフィールのシミュレーション実験を行う。高分解能で測定された透過パルス光の時間プロフィールを光拡散方程式によって逆問題的に記述する（どのような吸収係数・散乱係数であれば、得られた時間プロフィールになるのかを数値解析によって推定する）。また、CW 光による密度推定の可能性を検討する。

4. 研究成果

2010年度は、ピコ秒オーダーのTOF-NIR計測システムの基本設計および試作が主たる研究開発業務となった。当該装置は、生体計測にはしばしば適用されるが、木材を対象とする実験は世界初となるため、細胞壁多層構造試料からの透過光を正しく計測できるシステムを確立することが実験の大前提となる。複数の装置メーカーと基本設計について討議し、最終的に浜松ホトニクス社製の超高速光検出装置（ストリークカメラ）を基盤とするTOF-NIR計測システムを構築することとした。既往の研究から明らかにされている透過性能の高い波長846nmの半導体パルスレーザー光（時間幅：100ps）を木材に照射し、材内部での吸収・散乱の時間変化を精密測定した（図1）。供試材はカラマツの気乾材であり、早材部と晩材部における透過光時間プロフィールをストリークカメラによって検出した。

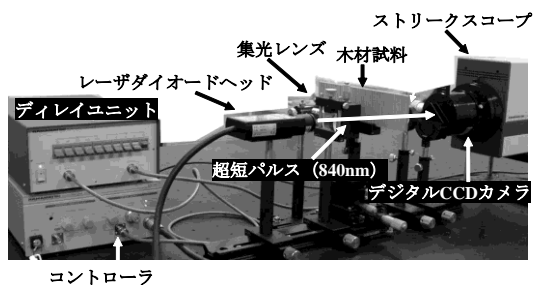


図1 実験装置の概要

測定パルス光の一例を図2に示す。実験の結果、厚さ5mmまでの木材試料から透過光の検出が可能となることがわかった。さらに、様々な樹種の時間プロフィールを比較・検討した。ミズキ、キリ等の広葉樹は針葉樹よりもブロードな時間プロフィールになることがわかった。さらに、時間プロフィールと密度との関係を明らかにするために、入射パルス光のピーク強度およびピーク時間を基準とする減光度および遅れ時間を定義した。遅れ時間と密度との間には線形関係が認められたが、減光度と密度との間には明確な関係が認められなかった。

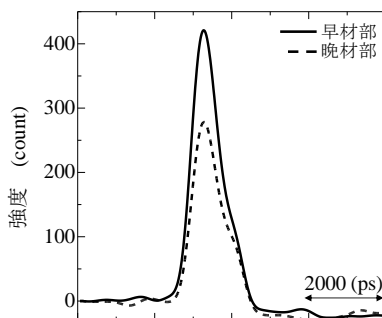


図2 早材部と晩材部における透過光時間プロフィール

最終的に透過光を数十 μm オーダーの空間分解能で測定することが可能となった。これにより、木材の準微視的領域の非破壊材質評価ができる新たなツールとしての有用性が期待されるようになった。

また、光拡散方程式の順問題および逆問題解法によって木材中の光伝播経路をシミュレートすることを試み、既知の吸収係数・散乱係数を光拡散方程式に代入して得られたパルス波形（理論値）と、本計測で得られた波形（実測値）を比較した。試料厚さが14.5mm程度の場合は理論値と実測値が一致し、木材を光学的に均質な素材とみなして差し支えないことが明らかになった。

2011年度は、前年度の基礎的検討を踏まえて、高出力を持つ近赤外レーザー光（CW光）を試料に照射して透過光出力を連続測定するシステムを考案した（図3）。木材の密度評価の可能性について検討することを目的として、系統的な実験を行った。供試材料のベイマツに近赤外レーザー光を照射し透過光量を測定した。

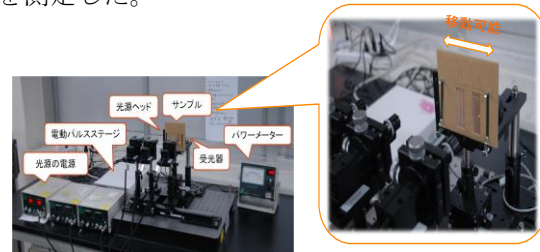


図3 近赤外CW光測定装置の概要

測定波長は780nm、830nm、904nmとし、電動パルスステージにより照射位置を移動させながら測定を行った。木材の早材部・晩材部の透過光量の違いを調べた。また、ストリークカメラを用いて、試料内部でのピコ秒オーダーの極短時間パルスレーザー光伝播状況（波長846nm）を観察した。早材部・晩材部の光強度のピーク値およびピーク時間の違いを調べた。また、X線デンストメータを用いて測定した値との対応を調べた。

いずれの測定方法においても、早材部と晩材部で、密度に対応して透過光量が明瞭に変動した。CW光の照射スポット分解能に対応して、X線デンストメータと同様の密度変化をとらえることができた。また、パルス光測定では、晩材部で透過光度のピーク値の減少およびピーク時間の遅れが確認できた。次に、木材の色の違いが透過光強度におよぼす影響を調べた。心材部と辺材部で材の色が明確に異なるスギまさ目材を200 μm の厚さに加工し、木材心材部と辺材部の透過光量の違いを調べた。いずれの波長でも心材・辺材間の透過光強度は、早材・晩材間に比べ、変化が小さいことが明らかになった。この結果より、着色成分による木材の色の違いが透過光強

度におよぼす影響が小さいことが示された。ピコ秒オーダのパルス光を木材に照射して、その変動から材質を推定するためには、装置系の信頼性を十分高める必要がある。CW光とパルス光計測実験結果を比較検討することにより、信頼性の高い測定実施が可能となった。

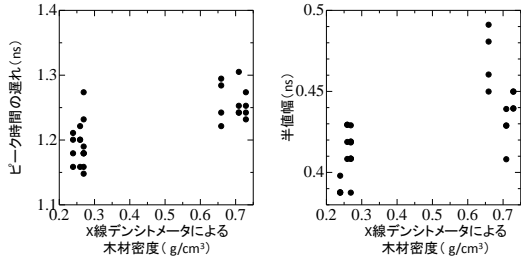


図4 X線デンストメータによって会則された木材密度と時間プロフィールとの関係

2012年度は、ベイマツまさ目板への照射位置を移動させながら測定を行い、照射部位による光伝播の違いを検討した。光伝播を記述する各光学パラメータとX線デンストメータによる木材密度との関連を調べた。木材密度の増加に伴い、透過光パルスピーク値およびパルス波形面積は減少し、ピーク時間の遅れおよび半値幅の増加が確認できた。このことから、木材密度が増加すると光路長が延伸し、光が材内で吸収されやすくなることが示唆された。

上記の試料を飽水状態にし、室内に自然放置させながら同様の実験を行った(図4)。恒率乾燥段階では、含水率の減少に伴い吸収係数、散乱係数ともに減少した。減率段階においては、含水率の減少に伴い散乱係数が増加した。吸収係数・散乱係数の動向は試料表層部および内部における水分の存在状況と密接に関わっていることが明らかになった。上記の結果に基づいて、透過光時間プロフィールを説明変数とする多変量解析を行い、含水率の推定を行った結果、従来の近赤外反射スペクトルを説明変数にした場合よりも高精度で含水率が予測できることが明らかになった。

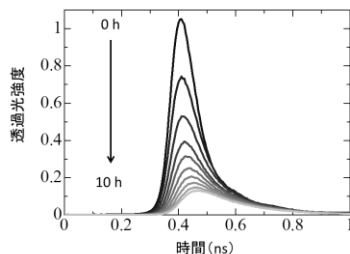


図4 含水率による透過光時間プロフィールの変化

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)

[学会発表] (計7件)

- ①倉田洋平、小石川将士、土川覚、ピコ秒パルスレーザを用いた木材の材質測定、第61回日本木材学会(2011年3月)京都
- ②小石川将士、土川覚、近赤外レーザを用いた木材の物性評価、第27回近赤外フォーラム(2011年11月)つくば
- ③倉田洋平、土川覚、ピコ秒近赤外パルスレーザを用いた木材の材質測定、第27回近赤外フォーラム(2011年11月)つくば
- ④倉田洋平、土川覚、ピコ秒近赤外パルスレーザを用いた木材の材質測定(I)-樹種による時間プロフィールの違い-、第62回日本木材学会(2012年3月)札幌
- ⑤小石川将士、土川覚、近赤外レーザを用いた木材の物性評価(第一報)-密度測定の可能性-、第62回日本木材学会(2012年3月)札幌
- ⑥北村竜之介、小石川将士、土川覚、近赤外レーザ光による木質材料の精密非破壊検査、第28回近赤外フォーラム(2013年3月)那覇
- ⑦北村竜之介、土川覚、近赤外CWレーザ光による木質材料の物性評価-連続密度測定の可能性-、第63回日本木材学会(2013年3月)盛岡

[その他]

ホームページ等

<http://www.agr.nagoya-u.ac.jp/~mechbio/>

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

岡田 英史 (OKADA EIJI)

慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号：40221840

藤本 高明 (FUJIMOTO TAKAAKI)

鳥取大学・農学部・准教授
研究者番号：40446331

(3) 連携研究者

吉田 正人 (YOSHIDA MASATO)

名古屋大学・大学院生命農学研究科・准教授

研究者番号：30242845

今井 貴規 (IMAI TAKANORI)
名古屋大学・大学院生命農学研究科・准教
授
研究者番号：20252281