

令和元年6月13日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02559

研究課題名(和文) テラヘルツ時間領域分光法によるエンジニアリングウッドの非破壊総合材質診断

研究課題名(英文) Non-destructive measurement of engineering wood using terahertz time-domain 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) 23,200,000円

研究成果の概要(和文)：木材への透過性に優れ、安全性の高いTHz領域電磁波によるエンジニアリングウッド非破壊評価手法の開発を行った。一連の研究によって、THz時間領域分光法によって合板の密度・含水率・繊維走向を高精度・非破壊で推定できることが示された。また合板に用いられている接着剤の定性も可能であった。さらに、上記性質の画像化および合板の各層の診断可能性も示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

THz時間領域分光法によってエンジニアリングウッドの密度・繊維走向・接着材評価が可能であることが分かった。今後装置の小型化・低価格化が進みエンジニアリングウッド製造工場への導入(製造ラインにおけるエンジニアリングの非破壊・非接触品質評価)ができれば、品質の安心・安全対策、製造プロセスの最適化、製造コストの削減および木質資源の有効利用を達成できる。

研究成果の概要(英文)：We developed the engineering wood nondestructive evaluation method by THz electromagnetic wave with high permeability to wood and high safety. A series of studies have shown that it is possible to estimate the density, moisture content and fiber orientation of plywood with high accuracy and non-destructiveness by THz time domain spectroscopy. It was also possible to characterize the adhesive used in plywood. In addition, the imaging of the above properties and the diagnostic potential of each layer of plywood have also been suggested.

研究分野：木質科学

キーワード：THz時間領域分光法 非破壊計測 エンジニアリングウッド 有効媒質理論

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは、長年分光学的手法による木質材料の材質評価に関する研究を展開しており、「近赤外光の非破壊センシング性に着目した木材の物理的・化学的情報の高精度推定(多変量ケモメトリックス解析援用による近赤外分光法)」や「極短時間パルス光の直進性・時間分解性に着目した木材の光吸収・散乱特性の把握(飛行時間分光法)」に関する成果を発表するとともに、「農林水産技術会議:新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業-広帯域分光方式による革新的な木材多形質高速非破壊測定装置の開発-、課題番号 22003」を主宰し、実機を作製してその普及に向けた展開を産学一体で取り組んでいた。研究代表者らを始めとする世界各国での約 20 年間に及ぶ基礎・応用研究により、近赤外分光法が木質材料の非破壊計測手法として有用であることが国際的にも認識されるようになり、製造現場での活用や製品開発が進められてきた (Tsuchikawa and Kobori, J. of Wood Science, 2015)。

ところで、分光学的手法に基づく材料評価では、「どのような項目がどの程度の精度で測定できるのか?」を見きわめることが重要となる。近赤外分光法の最大の問題点として、「木材への透過性が数mm程度しかないために、材料表層部の分光情報からやや強引に試料全体の物性評価を行ってしまう」ことが指摘される。レーザー等の高出力光源や微弱光検出器を用いるという方法もあるが (Tsuchikawa and Kitamura, Wood Mat. Sci. & Eng., 2015) 高精度検出を達成するためには、やはり測定試料厚さに制限が加わってしまう。このことを克服して実際の木質材料の特性や寸法に見合った計測を行うためには、「異なる電磁波領域における非破壊計測システムを構築する」ことが新たな展開として要求されていた。X線やマイクロ波を活用することも以前から活発に研究・実用化されていたが (例えば、Mannes et al., Wood Sci. Technol., 2010 や Schajer, Holz als Roh- und Werkstoff, 2006) 評価項目や空間分解能、さらには安全性や操作性をも考慮して適切な波長帯を決定することが強く求められていた。例えば、エンジニアリングウッドの品質評価に際しては、素材(ラミナ)と接着剤(化学物質)に関する項目を総合的に判断することが望ましいが、これを満足する手法は確立されていなかった。製品品質の安心・安全対策への要求もますます高くなることは間違いなく、早急に課題すべき課題の一つであった。

## 2. 研究の目的

上記のような背景から研究代表者らは、テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) に着目し、これが木質材料の非破壊評価に適用可能かどうかを検討してきた。THz-TDS は、テラヘルツパルス波 (パルス時間幅: 数 ps) を試料に照射し、透過/反射パルスの波形をフーリエ変換することにより周波数ごとの振幅と位相を得るという新しい分光法である。複素誘電率や複素屈折率の周波数依存性を解析した結果、繊維走行、密度や材内部の水分分布が数 mm 程度の空間分解で高精度推定できることが明らかになっていた (Inagaki et al. J. Infrared. Milli. Terahz. Waves, 2014)。さらに代表研究者らは、複素屈折率の虚数部を周波数領域で展開 (スペクトル表示) すると、化学構成成分によってその特性が特徴的に異なることを見出した (Inagaki et al. Holzforschung, 2013)。ただし、テラヘルツ波は水分子に強く吸収されてしまうので、丸太等自由水を多く含んだものには適用できない。一方、繊維飽和状態以下の含水率であれば、10 - 20 cm 程度の透過は十分に可能である。以上より、「CLT、集成材、合板等のエンジニアリングウッドを測定対象とすると、材料の化学構成成分、密度、含水率、繊維走行が数mm程度の空間分解能で安全に非破壊評価できる」ことが強く期待されていた。そこで本研究では、「THz-TDS によってエンジニアリングウッドの品質評価が行える分光計測システムを新たに構築し、1) いろいろな物性値に関する高精度検量線を作成する、2) 数mm程度の空間分解で各種物性値をマッピングする、3) 構成エレメント各層の接着不良部位を検出する」ことを目指した。

## 3. 研究の方法

本研究は平成 28-30 年度にかけて実施した。

平成 28 年度は、計測システムの開発および THz-TDS によるラミナの含水率・密度・繊維走行の非破壊推定を行った。名古屋大学において、数百フェムト秒オーダの時間幅をもったパルス発振レーザー、光伝導アンテナ、および特注試料ホルダー、光学ベンチを主たる構成要素とするテラヘルツ時間領域分光システム (透過・反射方式) を設計・試作した。これによりテラヘルツビームスポットは 1.0mm を達成することができた。また、十分な SN 比を得ることが出来た。その後設計したシステムを用いて、木材試料の測定を試みた (Fig.1-(A))。いくつかの測定データ数・ステージ速度を検討し、木材にもっとも適した測定条件を決定した。その後、合板に用いられることの多いベイマツ材を複数用意し、そのテラヘルツスペクトルを測定した。ベイマツ単板 (厚さ 3mm) から 50 枚の試料を切り出し (20mm×20mm)、気乾状態でテラヘルツ時間領域分光測定に供した。試料の重量および寸法をテラヘルツスペクトル測定前と測定後に行った。木材の繊維方向とテラヘルツ波の偏光方向の角度が 0°および 90°となるようスペクトルを測定した。試料が無い状態の透過スペクトルをリファレンススペクトルとした。テラヘルツスペクトル測定後、試料を 105 °C で 48 時間乾燥させて全乾状態とし、得られた全乾重量とスペクトル測定時の重量および寸法

から、試料の全乾密度および含水率を算出した。平成 29 年度は、THz-TDS による接着層状況の推定および各物性値のマッピングを試みた。まず 12 樹種の含水率・密度・繊維走向を同時に推定する手法を開発した。この実験では含水率・密度の異なる 12 樹種の試料を様々な繊維走向角度で THz-TDS 測定した。テラヘルツスペクトル測定後、試料を 105℃ で 48 時間乾燥させて全乾状態とし、得られた全乾重量とスペクトル測定時の重量および寸法から、試料の全乾密度および含水率を算出した。繊維走向の予測では、木材の複屈折性および二色性の両方を加味してフィッティングを行うアルゴリズムを提案した。またこのフィッティングをもとに得られた屈折率・吸収係数の最大値・最小値から、含水率・密度を推定した。これらの情報を基に複数の木材の異なる箇所を THz-TDS 測定し物性のマッピングを試みた。

平成 30 年度は、反射方式による構成エレメント境界面の情報検出を試みた。まず(層数・接着剤の種類および密度が異なる)複数の合板を THz-TDS によって透過方式で測定した。得られた複素屈折率から上記性質を同時に推定する手法を考案した。さらにこれら合板を反射方式により測定し、得られたパルス位置から第 1 層目より反射した情報を抽出し、第 1 層の品質評価を試みた。

また、(当初目的には含んでいなかったが)一連の研究により(木材の強度特性に大きく寄与する)セルロースマイクロフィブリル角(MFA)が推定可能であることが示唆されたため、これに関する実験も遂行した。あて材を含むスギ材を放射方向に切り出し X 線回折法および THz-TDS 測定を行った。スギ材は未成熟から成熟材への移行にともなって MFA が減少する。また、あて材部では MFA が増加する。本試料を X 線回折法によって測定したところ十分な MFA の分散が見られた。THz 領域複素屈折率から X 線回折法によって得られた MFA 推定を試みた。

加えて、木材中の水分子の誘電率の推定を試みた。含水率・密度の異なる木材を THz-TDS 測定し、有効媒質理論を用いて木材中の水の複素誘電率の決定を試みた。

#### 4. 研究成果

##### 平成 28 年度成果

木材試料の THz 時間領域スペクトルに FFT 変換や各種演算をほどこして算出した周波数領域 0.1-0.2Hz における複素屈折率平均値から、Hashin らの報告にならない含水率および密度の同時予測を試みた。その結果単一樹種(ベイマツ単板)であっても、その全乾密度が十分な精度で予測できることが分かった(Fig.1-(B))。また、木材は複屈折性を持つことが知られているが、本設計システムにおいても試料の繊維方向に対する偏光方向の角度によって、複素屈折率が変化することが確認できた(Fig.1-(C))。さらに、様々な樹種および含水率の複素屈折率データおよび複素屈折率から、エンジニアリングウッドの一種である合板の反射スペクトルのシミュレーションを行った。これにより、合板の各層からのシグナルのピーク時間および強度を見積もることが出来た。また、実際に合板を測定し 2 層目までの情報を取得できる可能性を見出した。

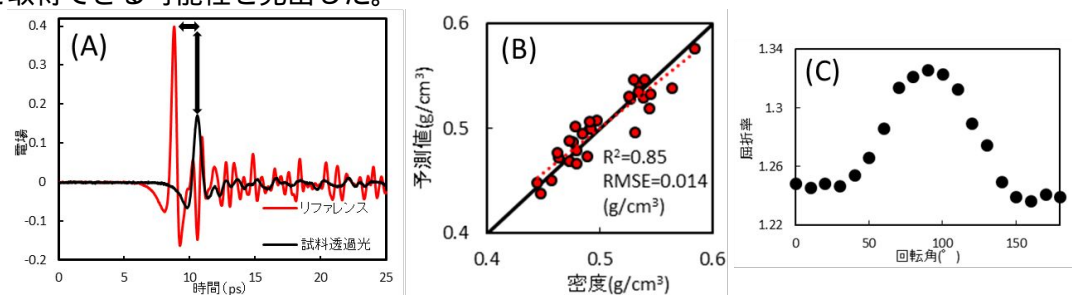


Fig.1 (A)リファレンスおよび試料の THz 時間領域スペクトル、(B)全乾密度と THz 誘電率から求めた密度の関係および (C) 繊維走向と偏光方向の角度による THz 領域屈折率の変化

##### 平成 29 年度成果

木材の複屈折性および二色性の両方を加味してフィッティングを行うアルゴリズムを提案した。これにより「偏光方向と繊維走向の間の角度」を任意の角度から 40°間隔で変更し 4 回測定を行いフィッティングすることで、試料の繊維走向を推定できることを示した(Fig.2)。またフィッティングをもとに得られた屈折率・吸収係数の最大値・最小値から、含水率・密度を推定することでより高い予測精度が得られることを見出した(Table1)。また同一木材の異なる箇所を THz-TDS 測定しこれを可視化したところ木材の部位により THz 透過信号が変化することを確認した。

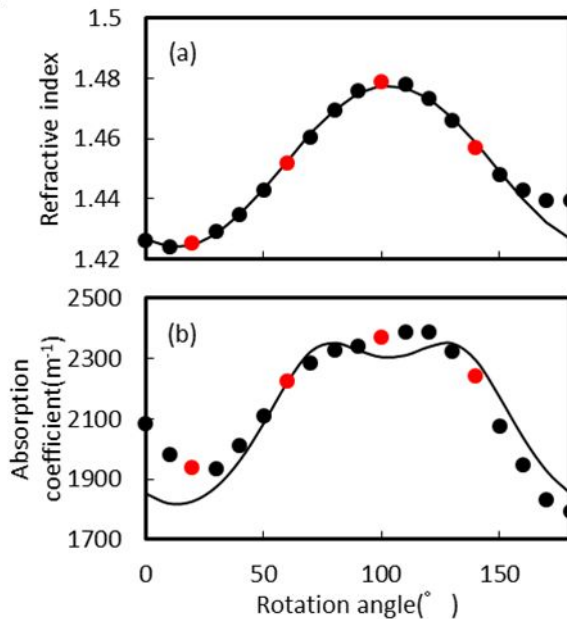


Fig.2 繊維走向と偏光方向の角度による THz 領域(A)屈折率および (B) 吸収係数の変化。赤丸がフィッティングに用いたデータ、黒線はフィッティングデータ。

Table 1 密度・含水率・繊維走向の予測結果

	データ範囲	標準偏差	予測決定係数	予測標準誤差
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	0.25 - 0.70	0.12	0.96	0.023
含水率 (%)	0.00 - 30.98	8.89	0.80	3.94
繊維走向(°)	40 - 100	20	0.90	17.25

#### 平成 30 年度成果

まず(層数・接着剤の種類および密度が異なる)複数の合板を THz-TDS によって透過方式した。合板の周波数 0.1THz における吸収係数と屈折率の散布図(Fig.3)を Support vector machine を用いて分類することによって合板に用いられている接着剤の定性が可能であることが示唆された。また合板の 0.1THz による屈折率は密度と高い相関関係にあった。

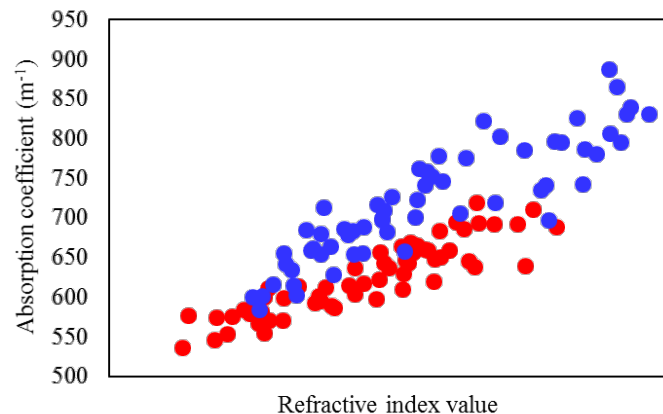


Fig. 3 合板の 0.1THz における屈折率と吸収係数の関係 (青色 MUF 系接着剤、赤色 PF 系接着剤)

また、H30 年度計画であった反射方式による信号検出方式の導入が完了した。現在このシステムによって測定したスペクトル情報から(これまでに得られた知見を援用して解析することで)合板内の接着不良箇所を非破壊で検出することを試みている。また、含水率・密度の異なる木材を THz-TDS 測定し、有効媒質理論を用いて木材中水分子の誘電率を決定した。その結果木材中の水の誘電率虚数部は含水率にともなって線形に変化することを見出した。これを加味して木材誘電率からその密度・含水率を予測したところ、含水率の予測精度が大幅に向上した。これらの成果を Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves に投稿し受理された。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Han Wang, Tetsuya Inagaki, Ian Hartley, Satoru Tsuchikawa, Matthew Reid “Determination of dielectric function of water in THz region in wood cell wall result in an accurate prediction of moisture content”, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 査読有、DOI: 10.1007/s10762-019-00594-0 (2019) 査読有

〔学会発表〕(計6件)

Han Wang, Satoru Tsuchikawa, Tetsuya Inagaki, Correlation between Complex Index of Refraction Value of THz Region and Wood Properties Measured by SilviScan, 2018 SWST/JWRS International Convention, 2018

Han Wang, Satoru Tsuchikawa, Tetsuya Inagaki, Inspection Of Microfibril Angle Of Sugi Wood By THz-TDS, IRMMW-THz2018, 2018

Moe Kashima, Satoru Tsuchikawa, Tetsuya Inagaki, Quality Evaluation Of Engineered Wood By THz TDS, IRMMW-THz2018, 2018

鹿島 萌、稲垣哲也、土川 覚、“テラヘルツ時間領域分光法による木材の繊維走行・密度・含水率の同時推定”、第68回日本木材学会大会、2018

鹿島 萌、稲垣哲也、土川 覚、“テラヘルツ時間領域分光法による木材の繊維走行・密度・含水率の同時推定”、日本木材学会中部支部大会、2017

稲垣 哲也、Matthew Reid、土川 覚、“テラヘルツ時間領域分光法によるベイマツ単板の含水率・密度予測”、平成29年度日本分光学会年次講演会、東京、2017

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：鈴木 滋彦

ローマ字氏名：Suzuki Shigehiko

所属研究機関名：静岡大学

部局名：農学部

職名：教授

研究者番号（8桁）：40115449

研究分担者氏名：小堀 光

ローマ字氏名：Kobori Hikaru

所属研究機関名：静岡大学

部局名：農学部

職名：助教

研究者番号（8桁）：20612881

研究分担者氏名：稲垣 哲也

ローマ字氏名：Inagaki Tetsuya

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：生命農学研究科

職名：講師

研究者番号（8桁）：70612878

(2)研究協力者

研究協力者氏名：Matthew Reid（UNBC, Canada）

ローマ字氏名：マシューリード

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。