

令和元年6月18日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K17783

研究課題名(和文) 平面方式拡散光トモグラフィー法による木質複合材料の内部品質評価

研究課題名(英文) Development of internal quality evaluation method for wood based materials by using unidirectional diffuse optical tomography

研究代表者

小堀 光 (Kobori, Hikaru)

静岡大学・農学部・助教

研究者番号：20612881

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：近赤外領域の光が有機材料内で直進せず散乱する性質を利用して、1方向からの光照射のみで材料の内部状態を可視化する『平面方式拡散光トモグラフィ』を提案した。散乱光画像計測から媒質の光学特性値を推定し、透過画像に光拡散シミュレーションを援用することで、任意の断面における画像を再構成する手法を確立した。本手法を応用することで、複合材料などの不透明な材料の内部の異物や欠点を検出できる可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ウッドプラスチックコンポジットなど不透明な材料では、目視あるいは可視波長領域の画像計測による内部欠点の検出は難しい。拡散光トモグラフィは安全な手法ではあるが、様々な部位から光を照射しなければならない。本手法では、一方向からの光の入射のみで内部の画像を再構成できることを示した。本手法を用いれば、従来では検査の難しかった形状の内部画像も評価できる可能性を示した。また、使用する波長を変化させることで、将来的には内部の成分分布も可視化できると期待される。

研究成果の概要(英文)：Internal failure detection of composite materials such as wood plastic composite is of importance to assure the mechanical properties of the products. Since most of organic materials are opaque, detection of internal failure is impossible by visible light. One of the solution is to use NIR diffuse optical tomography, however, it requires transmittance light acquisition by various angle. In this study, a new method called NIR unidirectional diffuse optical tomography was proposed. Scattering and transmittance image acquisition from single light incident and light propagation simulation was combined to reconstruct the internal image. By using this procedure, internal image at any depth of the material could be reconstructed with single light incident. Although further investigation for will be needed, this result is expected to apply the quality control of composite material.

研究分野：木質科学

キーワード：複合材料 近赤外光 画像計測 拡散光トモグラフィ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ウッドプラスチック (WPC) をはじめとする複合材料が正しく強度を発現するためには、フィラーとマトリックス界面の良好な接着とフィラーの均一な分散が不可欠である。界面の相容が不十分であったり、フィラーの凝集が生じると、そこが欠点となり強度が低下する。また、内部の気泡や微細な割れ、不純物の混入も問題となる。

このような材料の表面の欠点は目視や可視波長領域の画像計測などで検出することができるが、半透明(もしくは不透明)な材料の内部評価には可視波長領域の画像計測は利用できない。

可視光に近い近赤外光 (800 - 1000 nm) は静脈認証や脳機能イメージングに使われるなど、『生体の窓』といわれるほど透過性が高く、多くの有機材料に対しても高い透過性を持つことから、食品等の内部の異物検出に有効ではないかと期待される一方で、近赤外光は媒質内で直進せず散乱してしまうため、内部に異物があったとしても、深い場所にある異物は影がぼやけてしまう。このため、光の透過性能とは関係なく、通常の透過画像計測によって異物検出が可能なのは表面近傍のみに限られてしまう。このことから、近赤外光を用いた内部評価では散乱による画像のボケを解消することが必要不可欠であることが課題として残された。

物質内部を透過する光は、物質内の関与媒質によって散乱された拡散光と一度も散乱せずに透過する直接透過光に大別される。直接透過光のみを検出することができれば、まったく輪郭のボケない明瞭な透過像を得ることが可能である。直接透過光と拡散透過光を分離する方法として、いくつかの方法が考案されている。例えば、直接透過光が最短時間で透過面に到達するのに対し、拡散透過光では透過するまでに時間遅れが生じることを利用して、超短パルスレーザとストリークカメラにより直接透過光のみを取り出す方法(時間分解法)や、偏光フィルターを用いて入射光と同じ偏光だけを取り出す方法(偏光法)などがある。

さらに、細かなチェッカーパターンによる光源を使って拡散透過光と直接透過光を分離する手法(高周波光源法)も考案された。しかしながら、時間分解法ではピコ秒オーダーでの測定が必要で測定系が非常に高価になること、偏光法では透過光量が非常に弱いことなどの欠点もある。そもそも、高散乱媒質や厚みのある媒質の場合、入射したすべての光が拡散光となり、上記のような方法は適用できない。

高散乱媒質内の近赤外光の光伝達を用いて断層像を再構成する方法として、拡散光トモグラフィがある。本手法は X 線 CT と同様に、対象に向けて光を入射する。X 線と異なり近赤外光は対象内部で著しく散乱するため、透過側に複数設置したセンサにより散乱透過光を受光する。この測定を対象の様々な角度から行うことで、断層像を再構成することができる。ただし、本手法は対象の様々な角度から光を入射する必要があるため、材料の厚さだけでなく、幅に制限を受ける。

近年、撮影後の画像のフォーカス位置を任意に変えられる技術がデジタルカメラやスマートフォンに搭載された。これはライトフィールドカメラと呼ばれる、撮影した後の画像のフォーカス位置を自由に変えられる画像計測技術である。通常のデジタル画像撮影では、イメージセンサの各ピクセルに到達した光の強度が記録されるのに対し、ライトフィールドカメラでは、各ピクセルの中に二次元のサブピクセルを配置することで、各ピクセルに到達した光の向きまで記録することができる。拡散光の場合、媒質内で直進しないためライトフィールドカメラの原理を直接応用することはできないが、光拡散シミュレーションを援用することで、ある場所における透過光が媒質内のどの領域から来たのかを確率論的に特定することは可能であると考えられた。

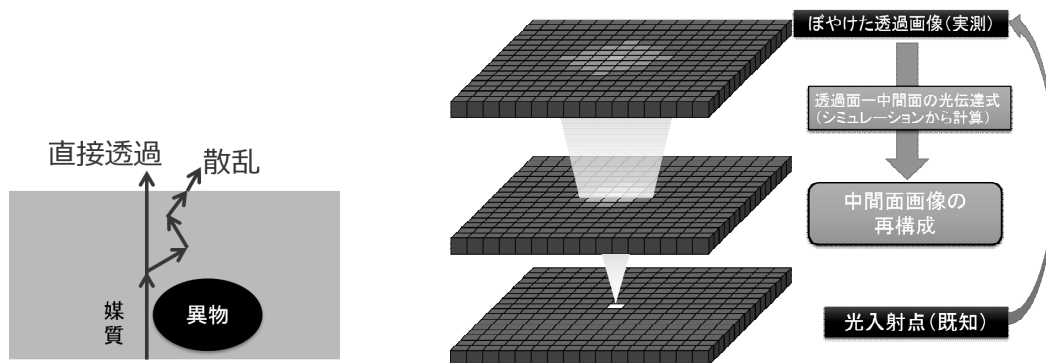


図1. 直性透過光と散乱透過光

図2. 画像再構成の手順

### 2. 研究の目的

本研究では、WPC等の複合材料の内部品質評価手法として、透過光から直接透過成分を分離するのではなく、拡散光から中間面の画像を再構成する方法を確立することを目的とする。近赤外光が媒質内で広く拡散することを利用して、従来の拡散光トモグラフィのように様々な角度からの光入射を行わずに、1方向からの入射だけで断層像を再構成することを目的とする。

そこで、モンテカルロ法をベースとする光拡散シミュレーションを用いた画像再構成法の構築と、シミュレーションに必要な光学特性値の簡易な推定手法の構築を目的とした。また、提案手法が実測定に適用可能か評価するために、モデル物質を用いた等価散乱画像計測を行い、検出限界を評価することを当初の目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 散乱光画像計測による木質複合材料の光学特性値の推定

木粉充填率の異なる厚さ 2mm のポリプロピレン(PP)ベースウッドプラスチックコンポジットの側面から光ファイバを用いて近赤外光を水平に入射した。試験体上部に設置した InGaAs カメラを用いて散乱光画像を撮影し、入射点からの距離に応じた散乱光強度分布の計測値を得た。また、光拡散方程式に任意の光学特性値(吸収係数  $\mu_a$  ( $\text{mm}^{-1}$ ) および等価散乱係数  $\mu_s'$  ( $\text{mm}^{-1}$ )) を代入し、入射点からの距離に応じた散乱光強度分布の理論値を算出した。散乱光強度分布の理論値と実測値間でフィッティングを行い、各木粉充填率の試験体に対応する  $\mu_a$  と  $\mu_s'$  の推定を行った。

#### (2) モンテカルロシミュレーションを用いた媒質内の光伝達モデルの構築と中間面の再構成手法の検討

厚み 10 mm、幅方向が無限の媒質の底面の点から垂直に光を入射するモデルを作成した。入射した光の挙動は、媒質の光学特性値(吸収係数  $\mu_a$  ( $\text{mm}^{-1}$ ) および等価散乱係数  $\mu_s'$  ( $\text{mm}^{-1}$ )) に基づき光路長  $L$  と散乱角  $\omega$  を一様乱数によって決定した(図3)。入射点の真上の様々な深さに光を吸収する物質が存在する場合を想定して本シミュレーションを行い、透過光強度分布図を得た(図4)。この図にランダムノイズを加えたのち、行ベクトル  $T$  に展開した。また、光を吸収する物質がない状態におけるシミュレーションを行い、光子の移動と各地点での光子のウェイト記録し、中間面の任意の位置にある光子が、透過面の任意の位置に到達する確率を四次元配列  $B'$  を計算した。この四次元配列は最初の 1,2 次元が中間面の  $x, y$  座標を、3,4 次元が透過面の  $x, y$  座標にそれぞれ対応している。この 4 次元配列  $B'$  を二次元に展開した  $B$  と  $T$  を用いて、中間面の相対光強度分布  $X$  を算出した。

$$X = ((B^T)^{-1}T^T)^T$$

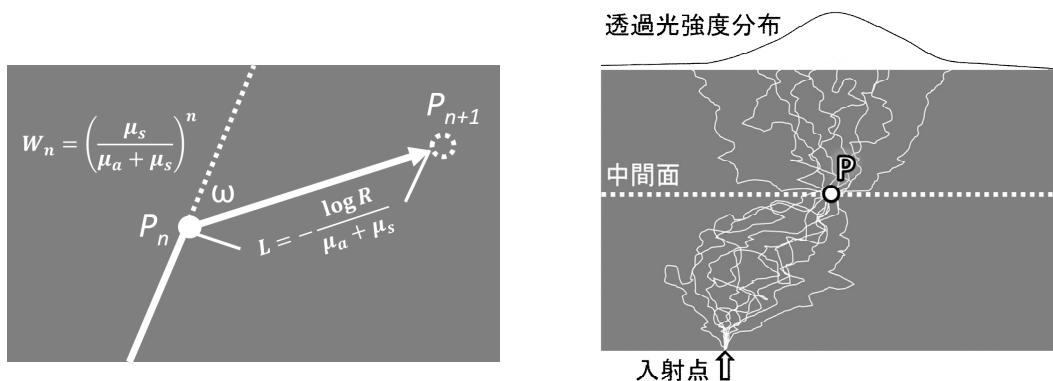


図3 . シミュレーションにおける光子の挙動

図4 . 中間面から透過面への光子の移動を示す概念図

#### (3) モデル溶液を用いた画像計測

様々な濃度に調整した CNF、牛乳の懸濁液と炭素棒(直径約 0.5 mm)を厚さ 10 mm のガラスセルに封入し、側方から光を照射し散乱透過画像を撮影した。

### 4. 研究成果

#### (1) 散乱光画像計測による木質複合材料の光学特性値の推定

図5に木粉充填率の異なる WPC の近赤外散乱光画像を示す。木粉充填率の増加に伴い、入射点近傍における強度が高くなり、遠方への光の到達が減少していることが確認できる。これは、木粉の存在により近傍における光吸収が起きやすくなったためである。

表1に上記の画像と光拡散方程式のフィッティングにより算出した光学特性値を示す。 $\mu_s'$ は概ね木粉充填率の増加に伴い増加する傾向が認められたが、 $\mu_a$ は値が小さく、特定することができなかった。

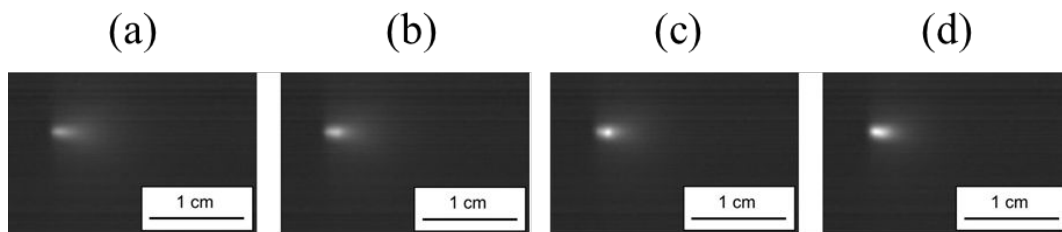


図5 . WPC の散乱光画像 (a) 木粉充填率 0% (b) 木粉充填率 5%  
(c) 木粉充填率 15% (d) 木粉充填率 25%

表1 . 推定された光学特性値

Filler ratio ( wt% )	$\mu_a$ ( $\text{mm}^{-1}$ )	$\mu_s'$ ( $\text{mm}^{-1}$ )
0	$1.0 \times 10^{-6}$	0.28
5	$1.0 \times 10^{-6}$	0.41
15	$1.0 \times 10^{-6}$	0.41
25	$1.0 \times 10^{-6}$	0.53

## (2) モンテカルロシミュレーションを用いた媒質内の光伝達モデルの構築と中間面の再構成手法の検討

一例として、図6に様々な深さで再構成した中間面の相対強度画像を示す。本結果は底面の中央部1点から光を入射し、光を吸収する物質は入射点より2.5 mmの高さに設置したものである。図6(a)は、最も透過面から遠く、かつ異物よりも下側で画像を再構成したものである。相対強度分布は、媒質の任意の位置における透過光強度に対する比を表すものであるから、再構成する面が媒質のみの場合、理想的には相対強度は1になる。この時、相対強度は正しく表現されなかった。一方で、図6(b)に示す通り、異物と再構成する中間面の高さが一致するとき、異物の形状を正しく再構成できることが明らかとなった。画像の周縁部の相対強度分布にばらつきが大きいのは、画像中心から光を入射したときに、中間面において周縁部まで光が到達していないためであると考えられる。図6(c)では、異物の形状がぼんやりと認識できるほか、相対強度が正しく表現できている部位が(b)に比べて中心付近に局限された。これは、透過面に近づくにつれ、入射点からの距離が長くなり、到達する光の強度が弱くなるためであると考えられる。これらのことから、

- ・ 異物の位置と中間面の位置が一致する場合、相対強度分布を再構成することが可能
- ・ 再構成する面よりも上側に異物がある場合、正しい相対強度分布を再構成できない
- ・ 相対強度分布を再構成できる範囲は入射面からの距離によって異なる

ことが明らかとなった。

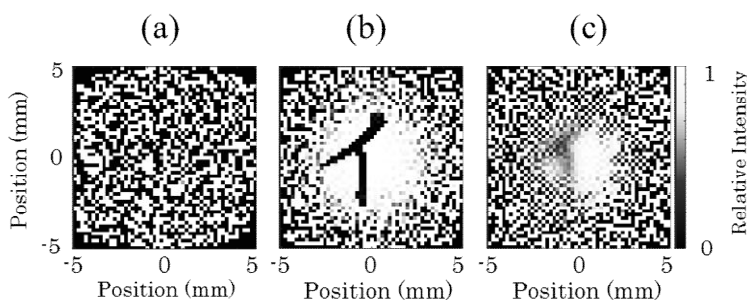


図6 . 再構成した中間面画像 (a) 入射点より 1 mm (b) 入射点より 2.5 mm (c) 入射点より 4 mm

上記の結果を踏まえ、底面および上面から一定間隔で光を入射し、各々の入射点に対応する透過画像から再構成した中間面の相対強度画像を重みづけして重ね合わせることとした。一例として、入射間隔を0.8 mm間隔として、上下両面から光を入射した場合における中間面の相対強度画像を示す。このとき、異物の位置は底面から、1.5、3.5 mmの2か所とした。図7(a)(d)に示す通り、底面、上面のいずれの方向から光を入射した場合においても、再構成によって入射面から遠い方にある異物の形状が再現された。また、入射面に近い側の異物が存在する面で再構成を行った場合でも、その面に存在する異物の形状は再現されず、より遠くに存在す

る異物の形状が再現された(図7(b)(c))。これは、同一方向から光を入射したときに様々な深度で再構成した相対強度画像を比較し、深度に関わらず相対強度の低い場所が異物の存在する場所であることを意味する。これらより、上下の両面から光を入射することで、深さ方向に2つの異物が重なって存在する場合でも、両方の異物を認識できることが明らかとなった。また、図7(a)(d)に示す通り、複数の位置から光を入射したときの相対強度画像を重みづけして重ね合わせることで、周縁部の相対強度分布も表現できることが明らかとなった。一方で、図7(b)(c)に示す通り、同じ重みづけで重ね合わせた場合でも、周縁部の相対強度が正しく表現できない場合も認められた。このことから、入射面と再構成する面の距離によって、適切な重みづけ範囲が異なることが示唆された。

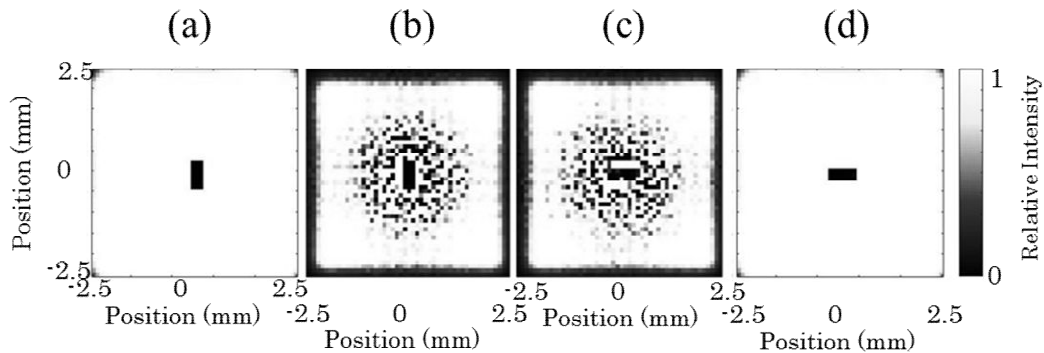


図7 . 再構成した中間面画像 (a) 底面から入射、底面より 3.5 mm (b) 底面から入射、底面より 1.5 mm (c) 上面から入射、底面より 3.5 mm (d) 上面から入射、底面より 1.5 mm

### (3) モデル溶液を用いた画像計測

図8に各混合条件における最大透過光強度と、半値全幅を示す。炭素棒の有無は最大透過光強度に大きな影響を及ぼさないが、半値幅が変化したことから、透過光強度分布には異物の情報が含まれており、当該濃度において、厚さ 10 mm 程度であれば、内部の異物の検出が可能であることが示唆された。しかしながら、散乱光画像によるフィッティングでは光学特性値が特定できなかったことから、現在までに明瞭な再構成画像は得られていない。今後は、光学特性値の推定方法も含めた画像再構成手法をさらに検討していきたい。

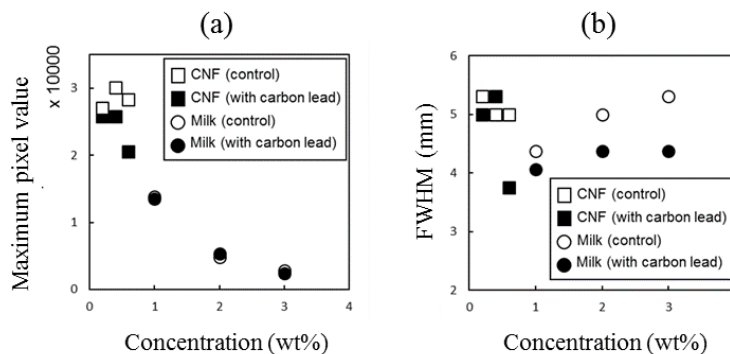


図8 . CNF および牛乳懸濁液の散乱透過画像における (a) 最大透過光強度 (b) 透過光の半値幅

### < 引用文献 >

T.Treibitz et al., Active Polarization descattering, IEEE Trans. Pattern Anal. Match. Intell., 31(3), 2009, 385-399

田中賢一郎, 向川康博, 八木康史, 平行高周波照明による透視画像の散乱光除去, 電子情報通信学会論文誌, 96 (8), 2013, 1834-1843

Ren Ng et al., Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera, Stanford Tech Report CTSR 2005-02, 2005, 1-11

Michael S. Patterson, et al., Time resolved reflectance and transmittance for the non-invasive measurement of tissue optical properties, Applied Optics, 28(12), 1989, 2331-2336

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計1件)

Yuya Yamazaki, Hikaru Kobori, Yoichi Kojima, Shigehiko Suzuki, Evaluation of inverse problem analysis for development of unidirectional diffuse optical tomography, the 6th Asian NIR Symposium, 昆明(中国) 2018年6月21日-24日

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

## 6 . 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし