近軸散乱光の出射特性に関する基礎的検討

学生員 木戸岡 智志 (北海道工業大学)

正 員 三澤 顕次 (北海道工業大学)

正 員 清水 孝一 (北海道大学)

非会員 北間 正崇 (北海道工業大学)

非会員 有澤 準二 (北海道工業大学)

Fundamental study on emission characteristics of near-axis scattered light

Satoshi KIDOOKA, Student-member, Masataka KITAMA, Non-member, Kenji MISAWA, Member, Junji ARISAWA, Non-member (Hokkaido Institute of Technology), Koichi SHIMIZU, Member (Hokkaido University)

Characteristics of near-axis scattered light were investigated to get optical imaging of biological body. In the Monte Carlo simulation and time-resolved measurement, shapes of light pulse emitted from a tissue-like scattering object were analyzed. The near-axis scattered light was detectable in terms of its intensity and angular characteristic.

キーワード: 光CT, 散乱, 光計測, 生体, 連続光

1. はじめに

近年, 近赤外領域(波長700~1,200 nm)の光を用いて生体組織の機能情報を取得する可能性が広く認められ, 光CT(光による生体断層イメージング)の実現などに向け, 各国で活発な研究が行われている⁽¹⁾. 光CTを実現する上で大きな障害となっているのは, 生体組織における強い光散乱の影響である. この影響を抑制し生体透過光を検出するため, 我々は入射ビーム光の光軸に沿って散乱された近軸散乱光に着目し, その特性をシミュレーションや実験⁽²⁾により調べてきた. しかしこの近軸散乱光の挙動や諸特性については, 原理的に説明はされているものの, いまだ詳細が明らかにされていない.

本論文では, 近軸散乱光の分離検出の可能性を調べるため, 時間分解手法を用いて散乱体透過光の出射特性について実験的検討を行った.

2. 近軸散乱光

生体組織は光学的に不均質であり, 強い散乱性を示す. この散乱の平均自由行程は1 mm程度であり, 1 cm厚みの組織でも, 散乱を受けない成分の検出は実用上困難である.

生体組織に入射されたビーム光は, 内部で散乱され種々の経路を通り, そのほとんどが光軸から大きくはずれて出射する. ただし, 生体組織は強い前方散乱性を有していることから, 一部の光は入射ビームの光軸に沿って伝搬し, 光軸方向に出射する. このように, 散乱を繰り返しながらも入射光軸にまつわりつくように伝搬し, 出射してくる散乱光を近軸散乱光(snake photonと俗称されることもある)と呼ぶ.

近軸散乱光を他の散乱光から分離検出することが可能になれば, X線CTと同様のアルゴリズムにより, 散乱の影響を抑制しつつ散乱体中の吸光度分布のイメージングが可能になると考えられる. しかし近軸散乱光については, 他

の散乱光から分離検出できるだけの強度を持つか, またどのような特性を有しているかについてすら, これまで報告例は見当たらない. 本研究では, 散乱体からの出射光に, 既存技術で分離検出可能な程度近軸散乱光成分が含まれるかどうかについて明らかにすることを試みた.

3. シミュレーション

まずモンテカルロ法に基づくシミュレーションにより, 近軸散乱光の時間分解波形を求めた. シミュレーションの詳細については, 文献⁽³⁾⁽⁴⁾を参照されたい. 図1に対象としたモデルの模式図を, 図2にそれらから得られた出射散乱光の時間分解波形を示す. なお, シミュレーションにおいては, 結果の解釈を容易にするためインパルス光入射(入射パルス光の時間幅無限小)を仮定している.

図2の波形bに見られるように, 散乱を経ない透過光成分の予想到達時間(図中矢印)から明らかに遅れて近軸散乱光成分が検出される. また図2a, bの比較から, 近軸以外の散乱光成分を含む場合(全散乱光と呼ぶ)に比べ, 近軸散乱光は, 遅い時刻の強度の落ち込みが顕著であることがわかる.

4. 計測

シミュレーションで得られた近軸散乱光の特性をもとに, 出射散乱光中に検出可能な程度近軸散乱光成分が存在するかどうかを検証する実験を行った.

計測の概略を図3に示す. 光源には, 波長752 nm, パル

図1 シミュレーションモデル

Fig. 1. Model of simulation

図2 シミュレーション結果
Fig. 2. Result of simulation

図3 計測試料
Fig. 3. Sample of measurement

ス半値幅38 ps, ピーク出力約25 mWのレーザダイオードを使用した。光源から出射した光は、コリメートレンズつき光ファイバによりビーム光として試料に照射される。試料によって散乱された光は、レンズとピンホールにより目的の受光角に制限された後、コア径200 μm のマルチモード光ファイバを介してストリークカメラ(時間分解能15 psec)に入力され、時間分解波形として処理される。

散乱体試料には、内壁間隔10 mmの亚克力水槽の内部にIntralipid水溶液を満たしたものをを用いた。なお計測では、散乱係数および受光角を変化させた際の時間分解波形を取得した。

5. 計測結果および考察

計測した受光パルス波形は、近軸散乱以外の成分と近軸散乱成分の両者を含んでいる。近軸散乱光は出射面においても光軸に沿って出射するので、受光角を小さくすることにより、受光信号に占めるその割合が増加すると考えられる。そこで、受光角を小さくした場合の出射パルス波形の変化を調べた。

散乱体の光学特性は、散乱体の光学的濃度optical density ($OD = \mu_s' \cdot d$: ここで μ_s' は等価散乱係数, d は幾何学的厚み)に大きく依存する。 $OD=10$ ($\mu_s' = 1.0 \text{ mm}^{-1}$, $d=10 \text{ mm}$) の場合の結果を図4に示す。ここでは出射パルスの形状を比較するため、得られた時間分解波形を最大振幅で規格化して示している。受光角の範囲を小さく($\circ \rightarrow \bullet$)しても、波形には大きな変化は見られない。つまり、近軸散乱以外の散乱光強度が近軸成分を大きく上回っており、近軸散乱光成分の変化が検出できていない。つまりこの $OD=10$ に対して本実験装置の感度や分解能では、出射方向の違いに基づく近軸散乱光の分離検出は、不可能と考えられる。しかし、図5に示す $OD=7$ ($\mu_s' = 0.7 \text{ mm}^{-1}$, $d=10 \text{ mm}$) の結果では、受

図4 出射パルス波形 ($OD=10$)
Fig. 4. Measured emission pulse ($OD=10$)

図5 出射パルス波形 ($OD=7$)
Fig. 5. Measured emission pulse ($OD=7$)

光角の範囲を小さくすることにより、波形のピーク以降の強度が明らかに減少するのがわかる。つまりこの結果は、 $OD=7$ 程度ならば、受光信号に占める近軸散乱光成分の変化が検出可能なレベルであることを示している。

これらの結果より、本計測条件下では、近軸散乱光が他の散乱光成分から分離検出できる強度と特性を有していることがわかった。この結果は、生体の等価散乱係数を 1.0 mm^{-1} とすると、少なくとも7 mm程度の厚みの生体組織においては、比較的単純な受光角の違いだけでも、近軸散乱光の分離検出が可能であることを示唆している。

6. おわりに

シミュレーションと実験により、時間分解手法を用いて近軸散乱光の出射特性を解析した。解析をとおり、特定条件下ではあるが、出射角の違いに基づき近軸散乱光を分離検出できる可能性が実証された。

謝 辞

本研究の一部は、第7回(社)照明学会研究・教育助成ならびに文部省科学研究費(09780810)により行われた。

(平成10年10月29日受付)

文 献

- (1) B. Chance and R. R. Alfano, ed., "Optical Tomography, photon migration, and spectroscopy of tissue and model media - theory, human studies and instrumentation -," Proc. SPIE, 2389 (1995)
- (2) 北間 正崇, 清水 孝一, 山本 克之, "光による生体断層イメージングの試み," 医用電子と生体工学, 31, 3, 282-288 (1993)
- (3) P. van der Zee and D. T. Delpy, "Simulation of the point spread function for light in tissue by a Monte Carlo method," Adv. Exp. Med. Biol., 215, 179-191 (1986)
- (4) 木戸岡 智志, 北間 正崇, 三澤 顕次, 有澤 準二, 清水 孝一, "近軸散乱光の特性に関する基礎的検討," 信学技報, MBE 98-102, 23-28 (1998)