



Title	多重散乱媒質中での光吸収測定
Author(s)	西村, 吾朗
Citation	電子科学研究, 2, 88-90
Issue Date	1995-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/24316
Type	departmental bulletin paper
File Information	2_P88-90.pdf



多重散乱媒質中での光吸収測定

超分子分光研究分野 西村 吾朗

多重散乱媒質中での光伝搬を Time-of-Flight 法と光子相関法により解析した。パルス光を媒質に入射すると散乱により光路長が長くなり時間的に広がった応答を示す。媒質に吸収が存在するときには光路長に応じて強度の減衰を受け、そのことを利用することにより媒質の吸光度が定量できることがわかった。一方、散乱光の電場相関は光路長分布関数の Laplace 変換の関係にあることを実験的に確かめ、その結果相関関数の時間シフトを調べることで、媒質の吸光度の定量化が可能であることを示した。

はじめに

生命活動を理解するためには、生体内での物質の流れを定量的に知ることが不可欠である。そのため従来からの生化学では、ある適当な状態で生体試料を固定し、適当な化学的あるいは物理的手法により定量してきた。これらの測定は基本的には破壊的測定が基本であるが、実際の生命活動を破壊し測定することになり、より高次の生命活動を研究する上では障害になる。そのため本研究分野では、非破壊的な手段として光を用い生体組織の吸収測定の定量化のための基礎的な実験を行ってきた。生体組織は、一般に組織の強い散乱とヘムタンパクなどに由来する強い吸収が光の透過を妨げ光学的測定を困難なものにしている。しかしながら、近赤外域の光に関しては、散乱係数が比較的小さくまた吸収も比較的小さいため、その透過光の測定が可能であることが知られている^[1]。しかし、強い散乱により光路に広がりが生じるため、吸光度などの定量的な測定手段は現在も確立していない。本稿では、本研究分野の最近の研究の中から、特に散乱光の時間的な応答の測定による吸収の定量化に関する研究と、散乱光の強度相関から媒質の吸収を定量化する研究について簡単に紹介する。

光路長分布の Time-of-Flight による測定

非常に濃い散乱体で散乱される光の伝搬を議論する場合、光のエネルギーの流れのみに注目し以下のよう

な輸送方程式で議論することが多い^[2]。

$$\left\{ \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \sigma \cdot \nabla + (\mu_s + \mu_a) \right\} I(\mathbf{r}, \sigma, t) = \mu_s \int_{\Omega} p(\sigma, \sigma') I(\mathbf{r}, \sigma', t) d\sigma' + q(\mathbf{r}, \sigma, t) \quad (1)$$

ここで、 p は散乱の位相関数、 q は光源、 μ_s, μ_a はそれぞれ散乱係数と吸収係数である。この式は、 μ_a が場所に依存しないとすれば変数分離され散乱光の時間応答は、

$$I(\mathbf{r}, \sigma, t) = I_0(\mathbf{r}, \sigma, t) \exp(-ct\mu_a)$$

と書けることが示される^[3]。ここで規格化しない光路長分布関数は、 $s = ct$ で与えられるため、吸収のない時の光路長分布関数を $P_0(s)$ とすると、

$$P\mu_a(s) = P_0(s) \exp(-\mu_a s) \quad (2)$$

となる。このことから、吸光度差は $\log\{P\mu_a(s)/P\mu'_a(s)\}$ の傾きを求めることにより定量できるはずである。

そのことを確かめるために、1 cm のガラスセルに入れた Intralipid 5% 溶液からの 90° 散乱の時間応答について、時間相関単一光子計数法で測定した。図 1 は、その結果である。ここで装置の時間分解能は約 120 ps (FWHM) であり、測定は 750 nm でおこなった。吸収物質としては CuSO_4 溶液を用いた。図に示されるように、吸収が増加するにつれ時間的に遅い部分の光強度がより減衰している。これはより遠くを伝搬してきた光に対しより吸収が寄与していることによる。さらに

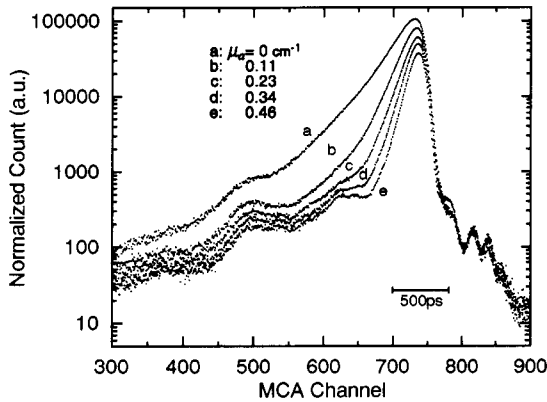


図1 Intralipid 5%試料からの散乱光の時間応答

この結果から装置関数をデコンボリューション法により取り除き吸収を含まない時間応答に対し比をとると、良い直線になった。このことは式(2)の示すことと一致する。そこでその直線の傾きを CuSO_4 濃度から予測される吸光度に対しプロットした図が図2である。結果は約10%ほど吸光度が大きく見積もられているものの、デコンボリューションの精度などを考え合わせると良い一致を示している。それに対し、吸光度の小さい2点が直線から大きくずれている。これは、 CuSO_4 と Intralipid との相互作用によりその領域で Intralipid が会合し散乱係数が大きく変化するためによるものであり、吸収による現象とは別である。したがって、この結果は吸光度差を散乱の時間応答より定量できることを示している。

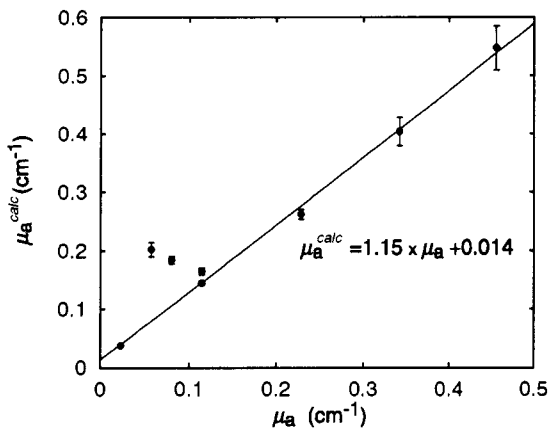


図2 時間応答から求めた光路長分布を用いて計算した吸光度

散乱光の光子相関測定

つぎに、散乱光の電場相関関数について考える。通常の単散乱領域での測定では、散乱光のゆらぎは散乱粒子のゆらぎを反映しており、その測定は高分子の形状などの測定に広く用いられている。多重散乱領域では、そのゆらぎが多重の散乱で積算されるため単散乱で得られる情報が隠されている。近年、そのような領域での電場の相関関数が次のような形で表されることが示された^[1]。

$$g^{(1)}(\tau) = \langle E^*(t)E(t-\tau) \rangle / \langle E^*(t)E(t) \rangle$$

$$= \int_0^\infty ds P(s) \exp\left(-\frac{2\tau}{\tau_0} \frac{s}{l^*}\right) \quad (3)$$

ここで、 $\tau_0 = (Dk_0^2)^{-1}$ で D は粒子の拡散定数、 k_0 は波数、 l^* は輸送平均自由距離である。この式は光路長分布関数の Laplace 変換が電場の相関関数を与えるということである。そこで、前項で用いた光の時間応答の Laplace 変換が散乱光の電場の相関関数と一致するかを確かめる。散乱光のゆらぎは前項で行ったのと全く同じ光学系を用い、光子相関法で測定した。求められた強度の自己相関関数は、Time-of-Flight の結果を数値的に Laplace 変換したものの2乗と比較する。図3には、測定で得られた相関関数と計算結果とを示した。計算には、単散乱で測定した結果から求めた $\tau_0 = 5.1 \text{ ms}$ を用い l^* および $g^{(2)}(0)$ をパラメータとした。示した結果は同一の $l^* = 0.024 \text{ cm}$ で計算され

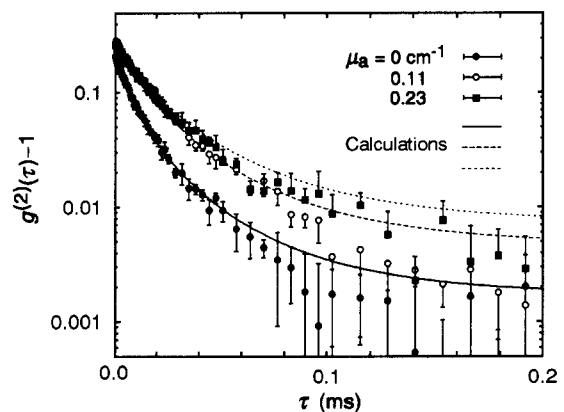


図3 Intralipid 5%溶液の強度相関関数 $g^{(2)}(\tau) - 1$ と、光路長分布のラプラス変換との比較

たものであり、データを良く再現している。したがって、式(3)が成り立っているものと考えられる。

式(2)と考え合わせると吸収が存在する場合自己相関関数は

$$g^{(1)}(\tau) = g_0^{(1)}(\tau + \tau_0 l^* \mu_a / 2) / N_P$$

と表されることがわかる。ここで $g_0^{(1)}$ は吸収の存在しない時の電場の自己相関関数である。このことは吸収が自己相関関数の時間軸のシフトにのみに寄与するということである。したがって、散乱係数や境界条件などが変わらない場合には、自己相関関数のシフトより吸収が定量化できる。なおこの結果は、 $l^* \mu_a$ の形から考えると輸送平均自由距離で距離を分解することにより吸収が定量化されたと考えられる。

結 論

以上のように多重散乱領域でも光路を分解することにより吸収を定量化することが可能なことが示された。このことは、今まで測定が困難であった多重散乱試料での吸収の定量化を可能とならしめるものである。

動的散乱法による測定は、通常単散乱領域に限られたものであった。本研究では、その方法を多重散乱体に応用することにより吸収測定が可能となることを示した。これは、動的散乱法の応用としては新しいものである。

謝 辞

この研究に関して、浜松ホトニクスから光電子増倍管の提供を受けた。深く感謝する。

【文 献】

- [1] 田村 守, O plus E, 1987年5月-1988年4月, O plus E, 1990年5月-1991年9月
- [2] A. Ishimaru, *Wave Propagation and Scattering in Random Media*, (Academic, New York, 1978).
- [3] K. Furutsu and Y. Yamada, *Phys. Rev. E* **50**, (1994)(in press).
- [4] D. A. Weitz and D. J. Pine, in *Dynamic Light Scattering*, edited by W. Brown, (Oxford, New York, 1993).