

光透視のための生体内光散乱特性の解析Ⅱ

— 透視像劣化を表す解析解の導出 —

○藤原 功 高 義礼¹ 加藤 祐次 清水 孝一

北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻

↑北海道学園大学工学部 ハイテクリサーチセンタ

1. はじめに

近年、光透視による体内機能イメージングの可能性が指摘されている。近赤外光による透視では、生体組織における光散乱が透視像劣化の主因となっている。これまで生体内の光伝搬解析については、多くの研究が行われてきた。しかし、生体透視像の劣化を理論的に示す解析解に至る研究は見あたらない。

我々は、生体透視イメージングにおける透視像の改善を目指し、劣化現象の理論的解析を試みている。今回、過去の報告例より現実をよく反映すると思われる解析解を新たに得たので、報告する。

2. 解析解の導出

解析対象とした系を Fig. 1 に示す。一般的な散乱粒子を含む媒質における PSF は、以下のように与えられる⁽¹⁾。ここでは入射光伝搬方向を軸とする円柱型対称系 (ρ, z) を考え、PSF は実空間座標 ρ の関数として取り扱う。

$$PSF(\rho) = \frac{k^2}{2\pi f^2} \int_0^{2a} \rho_d d\rho_d J_0\left(\frac{k\rho}{f} \rho_d\right) \Gamma(z, \rho_d) K(\rho_d) \dots \textcircled{1}$$

ここで、 $\Gamma(z, \rho_d) = \int I(z, \vec{\rho}, \vec{s}) \cdot e^{iK_r \vec{\rho} \cdot \vec{s}} d\vec{s}$

$$K(\vec{\rho}_d) = K(\rho_d) = 2a^2 \left[\cos^{-1}\left(\frac{\rho_d}{2a}\right) - \frac{\rho_d}{2a} \left(1 - \frac{\rho_d^2}{4a^2}\right)^{1/2} \right]$$

なお、 J_0 は 0 次ベッセル関数、 K_r は複素波数の実部、 $k = 2\pi/\lambda$ 、 ρ_d は深さ z における ρ 座標の差、 \vec{s} は方向ベクトルである。よって散乱体中の光強度 $I(z, \vec{\rho}, \vec{s})$ がわかれば PSF(ρ) が求まる。ここで散乱粒子が波長に比べて大きく、強い前方散乱性を有する場合、光強度は、輸送方程式に微小角近似を適用することにより以下のように与えられる⁽¹⁾。

$$I(z, \vec{\rho}, \vec{s}) = \frac{1}{(2\pi)^4} \int d\vec{k} \int d\vec{q} e^{-i\vec{k} \cdot \vec{\rho} - i\vec{q} \cdot \vec{s}} F_0(\vec{k}, \vec{q} + \vec{k}) K(z, \vec{k}, \vec{q}) \dots \textcircled{2}$$

ここで、 $F_0(\vec{k}, \vec{q}) = \iint I_0(\vec{\rho}, \vec{s}) \cdot e^{i\vec{k} \cdot \vec{\rho} + i\vec{q} \cdot \vec{s}} d\vec{\rho} d\vec{s}$

$$K(z, \vec{k}, \vec{q}) = \exp\left[-\int_0^z \rho_n \sigma_t \left(1 - \frac{1}{4\pi} P(\vec{q})\right) dz'\right]$$

$P(\vec{q}) = \iint p(\vec{s}) \exp(i\vec{s} \cdot \vec{q}) d\vec{s}$ 、 I_0 は入射面 ($z=0$) での光強度、 ρ_n は散乱体の密度である。②式に入射光として平面波: $I_0(\vec{\rho}, \vec{s}) = I_0 \delta(\vec{s})$ を、散乱パターンとしてガウス関数: $p(\vec{s}) = 4\alpha_p W_0 \exp(-\alpha_p s^2)$ を与えて計算すると、最終的に次式が導き出される。

$$PSF(\rho) = \frac{a^2 \alpha_p^2 I_0}{2\pi f^2 (\mu_s z)^2} \exp\left(-\mu_a z - \frac{\alpha_p}{\mu_s f^2} \rho^2\right) \dots \textcircled{3}$$

ここで α_p は波長に対する散乱粒子径のパラメータ、 W_0 は albedo である。

3. 考察

散乱媒質による画像変化を示す解析解として、次の画像伝達関数 $M(f)$ が報告されている⁽²⁾。

$$M(f) = \exp(-H) \\ H = \int_0^d \mu_a dz + \int_0^d \left[\mu_s \frac{1}{2} \int_0^2 p(s) |1 - J_0(As)| s ds \right] dz$$

この解析解では、光強度の減衰は μ_a のみに依存し、 μ_s は空間的な広がりにも寄与することがわかる。それに対し今回得られた解析解 (③式) では、吸収減衰 ($\propto \exp(-\mu_a z)$) に加え、拡散減衰 ($\propto (\mu_s z)^{-2}$) も表現されている。また、散乱係数や深さの増大に伴う PSF の広がり ($\propto \exp(-\rho^2/\mu_s z)$) も湯に示されている。これらは生体組織における画像劣化の特性をよく反映するものと考えられる。

4. おわりに

生体の光透視における画像劣化現象を解析し、その改善に役立てるため、生体組織の PSF を求める理論式を得た。今回得られた PSF は、これまで報告されていた散乱媒質中の解析解に比べ、生体組織の散乱吸収特性をよく反映するものであった。

今後、生体の光透視において想定される種々の条件に対しこの解析解の妥当性を調べ、その適用限界等を明らかにしていく必要がある。

本研究の一部は、文部省科学研究費により行われた。

参考文献

- [1] A. Ishimaru, "Wave Propagation and Scattering in Random Media," (Academic, New York, 1977)
- [2] Y. Kuga et al., Appl. Opt. 25, pp. 4382-4385, 1986

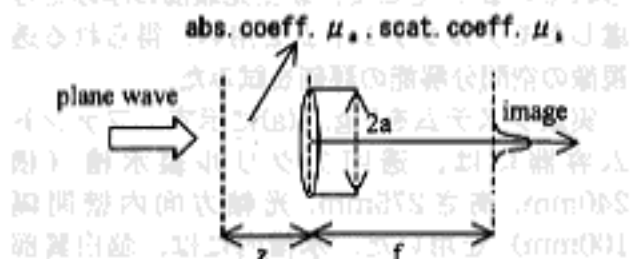


Fig. 1 Analyzed model.