



近赤外線を用いたヒト生体機能イメージング 技術の開発と応用

浜松医科大学 光先端医学教育研究センター
フォトンクス医学研究部 生体医用光学
星 詳子

1. はじめに

生体に照射された光は、主としてメラニン、血液中の赤血球に含まれるヘモグロビン (Hb)、そして水によって吸収されて通常深部までは到達しない。しかし、近赤外線 (700-2500 nm の波長領域) のうち生体における“光学的窓”と呼ばれる波長領域 (650-900 nm¹⁾や 700 nm-1200 nm²⁾など定義は研究者により異なる) の光は、Hb と水による吸収が小さく生体透過性が比較的高い。特に 900 nm より短波長側では水の吸収係数は Hb より一桁小さいが、筋肉内ミオグロビン (Mb) やミトコンドリアの電子伝達系末端に位置するチトクローム c オキシダーゼ (cyt. ox.) など限られた生体物質により吸収される。また、Hb と Mb は酸素化-脱酸素化状態によって、cyt. ox. は酸化-還元状態によって吸収スペクトルが異なる。このような近赤外線の性質を利用した血流や組織酸素化状態など生体機能の計測が、1977 年に Jöbsis によって始められた³⁾。

近赤外線スペクトロスコピ (near-infrared spectroscopy: NIRS) は、近赤外線を用いて農作物や食品などの成分を非破壊的に分析する方法として Norris によって 1960 年代に開発された⁴⁾。近赤外線を用いる生体計測は NIRS とみなされているが、生体で多重散乱しランダムな方向に拡散した光から生体情報を抽出するため、拡散光スペクトロスコピ (diffuse optical spectroscopy: DOS) とも呼ばれている (本稿では、DOS を用いる)。当初は組織酸素モニタとして開発されたが、1990 年代以降は神経機能イメージング法としても発展し⁵⁻⁷⁾、他の用途の DOS とは区別して機能的近赤外スペクトロスコピ (functional NIRS: fNIRS) と呼ばれている。

DOS の開発にほぼ並行して、近赤外線によるコンピュータ断層撮影 (optical computed tomography, optical CT) の開発も進められた。Optical CT には複数の呼称があるが、拡散光トモグラフィ (diffuse optical tomography: DOT) が最も一般的である⁸⁾。DOT はベッドサイドでも計測可能な新しい画像診断法として期待されているが、拡散光を用いる画像再構成は逆問題解析に基づいており、その逆問題は不良設定問題であるため高性能画像の取得は難しく未だ開発途上である。

本稿では、まず、DOS・DOT の基盤になる生体内光伝播、計測対象物質、計測法について概説し、次に fNIRS による脳研究を紹介しその課題をまとめ、最後に DOT について述べる。

2. 生体内光伝播

生体に照射された光と生体の相互作用は吸収と散乱で、吸収係数 (μ_a) と散乱係数 (μ_s) は吸収と散乱の程度を示し、距離の逆数 (mm^{-1} , cm^{-1}) の単位を持つ。 μ_a 値の逆数は媒体の中で光強度が吸収により照射光強度の $1/e$ に減光するまで光が進んだ距離で、 μ_s 値の逆数は散乱により照射光強度の $1/e$ になるまで光が進んだ距離である。 μ_a から Hb など光を吸収する物質の濃度を求めることができ、 μ_s から生体組織の構造や細胞形態などに関する情報が得られる。散乱は、異方性パラメータ g ($-1 \leq g \leq +1$) により前方、等方、後方散乱に分類され、 $g = +1, 0, -1$ は、それぞれ完全な前方、等方、後方散乱を示す。生体は g 値が 0.8-0.95 で^{9,10)}、強い前方散乱特性を示すが、光源から離れたところでは、