

表層組織計測に特化した空間分解式 小型組織オキシメータの開発

静岡大学 大学院光医工学研究科
庭山雅嗣

1. はじめに

散乱光を用いた生体計測の歴史は古く、耳朶を対象として酸素化状態を計測する装置（以後、オキシメータと呼ぶ）が 1940 年代に Millikan らにより提案されている¹⁾。散乱光計測では、送光器の光が受光器に到達する過程で様々な経路を通過するため、送受光器付近の広い領域の情報が複合した光学特性値が得られる。その送受光器を結ぶ領域は透過光計測では紡錘形で、反射光（後方散乱光）計測ではバナナ状に広がった形となる。オキシメータはその広い領域内の平均的な特性を把握するという意味で非イメージング計測系となり、数 cm^3 の組織内における酸素化状態の傾向を知ることができる。光で酸素化状態を知るオキシメータは 2 種に大別され、脈動信号から動脈血の酸素飽和度を算出するパルスオキシメータ²⁾と、組織の全血液（動脈、静脈、毛細血管）の酸素飽和度や血液量等を計測する組織オキシメータがある³⁾。パルスオキシメータは呼吸状態等把握のために広範に利用され、健康管理や医療現場で不可欠な存在となっている。それに対し組織オキシメータの利用は限定的ではあるが、組織の代謝や酸素の需給バランスがわかるため、脳科学⁴⁾や運動生理学⁵⁾、低酸素状態の検出⁶⁾の用途で研究や実用化が進みつつある。脳や筋組織などを計測する際には透過光はほぼ検出不能であるため後方散乱光を利用することとなり、送受光器間距離を離せば深部の計測も可能となるが検出限界があり、送受光器間距離を比較的長く 40 mm 程度に設定したときには体表から 15 mm 程度までの情報が取得できる。光吸収の情報を得るための原理は次節で述べるが、どの深度の情報が多くなるかということは測定原理で異なり、関心領域の深度に適した原理やセンサ配置を考慮する必要がある。また、用途によっても適した原理が異なり、内視鏡などと併用したいなどのニーズに応えるためにはより小型でリアルタイム性の良い手法が適している。本稿では、手術中などの医療現場で深度 4~5 mm 程度の組織における酸素化状態を捉えることに特化した組織オキシメータの開発について紹介する。

2. 光学特性値の測定原理

組織の酸素化状態を知るためには酸素化ヘモグロビン濃度 $[\text{O}_2\text{Hb}]$ と脱酸素化ヘモグロビン濃度 $[\text{HHb}]$ を求める必要があり、それらの濃度を算出するには複数の波長での光吸収係数 μ_a を決定しなければならない。 μ_a を測定する 4 つの原理について説明する。 μ_a の絶対量を求める手法として時間分解分光法 (Time Resolved Spectroscopy : TRS)、位相変調分光法 (Phase Modulated Spectroscopy : PMS)、空間分解分光法 (Spatially-Resolved Spectroscopy : SRS) があり、 μ_a の変化量を求める手法として、連続光分光法 (Continuous-Wave Spectroscopy : CWS) がある。図 1 は各手法の送受光方法と原理を模式的に示したもので、表 1 には各手法の特徴をまとめた。TRS はフェムト秒レーザ等の短パルス光を生体に入射し、そのインパルス応答から等価散乱係数 μ_s' と μ_a を算出する。PMS は 100 MHz~1GHz の周期波形でレーザ光を変調しておき、平均的な光路長や光減衰から μ_a と μ_s' を求める。SRS は 2 つ以上の受光器を用いて位置による光強度の差異を測定し、 μ_a を計算する。CWS では、基準となる最初の光量から吸光度変化を得て吸収係数変化 $\Delta\mu_a$ が算出される。TRS と PMS は μ_a と μ_s' の 2 変量を測定