

# [B35] 反射型パルスオキシメータの基礎研究

機械制御工学専攻 山田研究室

0133056 松下圭介

## 1. 緒言

パルスオキシメータは赤色、および近赤外の光を指などに照射して拍動に対応した検出光の変動から動脈血の酸素飽和度を計測する機器である。

現在一般的に使用されている透過型パルスオキシメータは、指や耳たぶに挟むためわずらわしさや痛みを感じたり、血流を阻害して傷害を発生することがある。そのような傷害などを防止し、装着部位の自由度を増やす反射型パルスオキシメータが望まれている。しかし、反射型パルスオキシメータでは、検出光強度が弱い、動脈の信号を拾っているのかどうか、などの課題がある。

本研究では、反射型パルスオキシメータの実現のため、反射型にした場合の生体組織内光伝播の解析や基礎実験によって反射型パルスオキシメータの特徴や可能性について検討した。

## 2. 検出光強度の計算

一般に、反射型は透過型に比べ検出される光強度が弱い。入射光強度を等しくしたときの検出光強度の比（反射型/透過型）を、光拡散方程式の解析解<sup>1</sup>を用いて検討した。

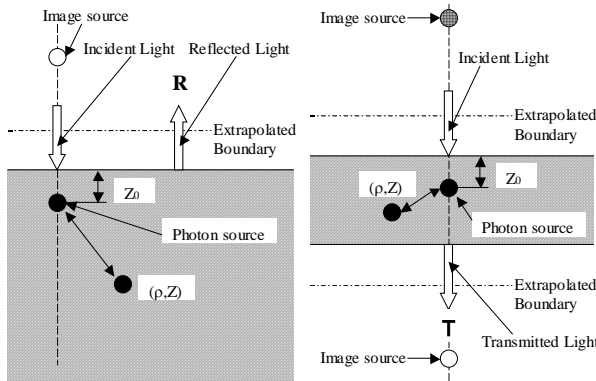


Fig. 1: Geometry of reflection (left) and transmission (right) model for calculation of the detected light propagated in tissue.

半無限媒体中の点光源による積分強度は、点光源と鏡像光源によるものの合計によって与えられる。

$$\Phi(\rho, z)|_{z=0} = \frac{1}{4\pi D} \left( \frac{e^{-\mu_{eff} r_1}}{r_1} - \frac{e^{-\mu_{eff} r_2}}{r_2} \right) \quad (1)$$

$$r_1 = [(z - z_0)^2 + \rho^2]^{1/2} \quad (2)$$

$$r_2 = [(z + z_0 + 2z_e)^2 + \rho^2]^{1/2} \quad (3)$$

$z_0$  と  $z_e$  は以下の式で表される。

$$z_0 = 1/\mu'_s \quad (4)$$

$$z_e = 2DA \quad (5)$$

$$D = \frac{1}{3\mu'_s} \quad (6)$$

ここで、 $\mu'_s$  は等価散乱係数、 $D$  は拡散定数、 $A$  は内部表面反射により与えられる係数である。 $\mu_{eff}$  は、有効減衰係数と呼ばれ、以下の式で表される。

$$\mu_{eff} = \sqrt{\frac{\mu_a}{D}} = \sqrt{3\mu_a \mu'_s} \quad (7)$$

ここで、 $\mu_a$  は吸収係数である。 $z=0$  での組織から反射してくる反射光強度  $R$  は以下の式で表される。

$$R(\rho) = -D\nabla\Phi(\rho, z)|_{z=0} = \frac{1}{2A}\Phi(\rho, z)|_{z=0} \quad (8)$$

一方、無限平板中の点光源による積分強度は、点光源と鏡像光源によるものの合計によって与えられ、無限級数になるが、この式は数項で収束する。

$$\Phi(\rho, z)|_{z=d} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{4\pi D} \left( \frac{e^{-\mu_{eff} r_{2n-1}}}{r_{2n-1}} - \frac{e^{-\mu_{eff} r_{2n}}}{r_{2n}} \right) \quad (9)$$

$$r_{2n-1} = \{[(n-1)(2d + 4z_e) + z - z_0]^2 + \rho^2\}^{1/2} \quad (10)$$

$$r_{2n} = \{[(n-1)(2d + 4z_e) + 2d + 2z_e - z - z_0]^2 + \rho^2\}^{1/2} \quad (11)$$

$z=d$  での組織から透過してくる透過光強度  $T$  は以下の式で表される。

$$T(\rho = 0) = -D\nabla\Phi(\rho, z)|_{z=d} = \frac{1}{2A}\Phi(\rho, z)|_{z=d} \quad (12)$$

なお、式(8),(12)中の係数  $A$  は表面での反射を表すパラメータで、表面の反射率が低い場合(黒色面)は  $A=3$ 、表面の反射率が高い場合(白色面)は  $A=20$  とした。

透過型において  $\rho=0$ 、プローブ表面を黒としたときの透過光強度  $T_B$  を基準とし、反射型プローブの表面が黒と白の場合の反射光強度を  $R_B, R_W$  としたとき、 $R_B/T_B$ 、および  $R_W/T_B$  の計算結果を図 2,3 に示す。

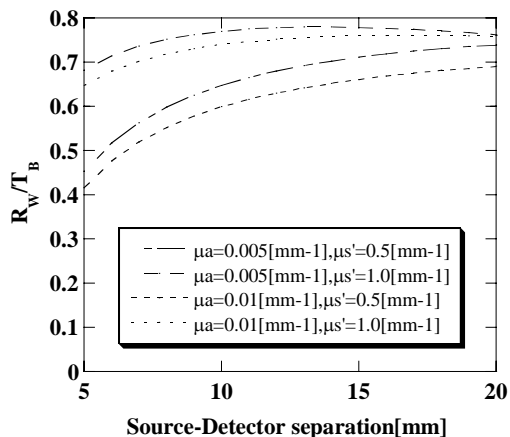
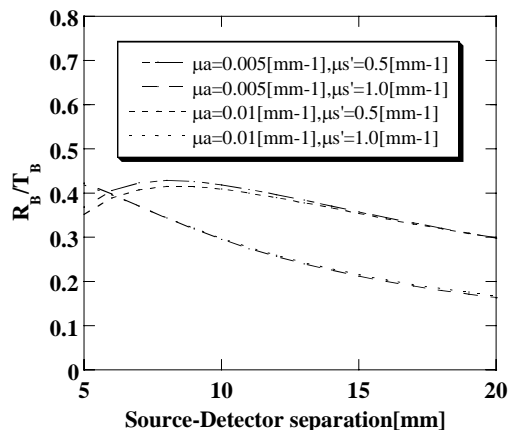


Fig. 2: Ratio of the detected light (reflection /transmission) for the probes with black (top) and white (bottom) surfaces (parameter  $\mu_a, \mu_s'$ ).

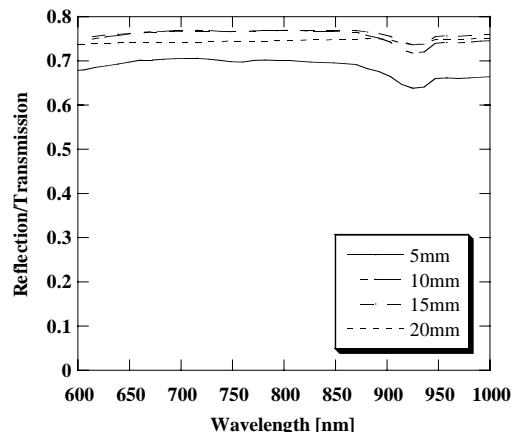
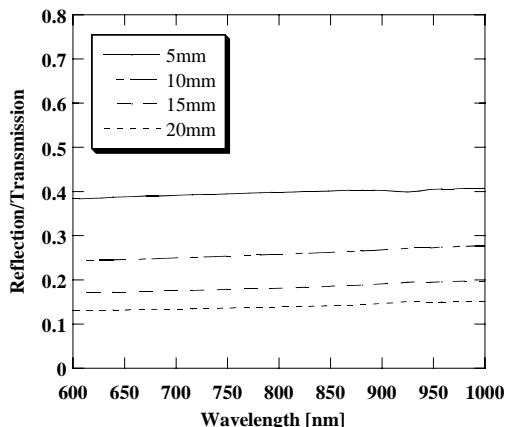


Fig. 3: Ratio of the detected light (reflection /transmission) for the probes with black (top) and white (bottom) surfaces (parameter wavelength).

吸収係数、等価散乱係数による変化(図 2)

光源 - 検出間距離を 10[mm]としたとき、反射型の検出光強度は、透過型に比べ表面黒では 30 ~ 40%、表面白では 55 ~ 75% になるという計算結果が得られた。

波長による変化(図 3)

同様に光源 - 検出間距離を 10[mm]としたとき、反射型の検出光強度は、透過型に比べ表面黒では 20 ~ 30%、表面白では 70 ~ 80% になるという計算結果が得られた。

### 3. 光の浸透深さの計算

反射型では、光が動脈まで到達し、脈波を検出できるかどうかを知ることが重要である。そのためには、光の浸透深さが生体組織の光学特性値と光源 - 検出間距離にどのように依存するのかを、光拡散方程式の解析解<sup>2</sup>を用いて計算した。

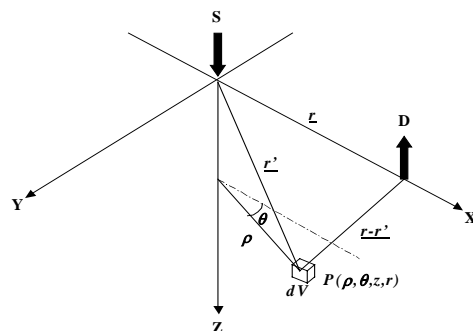


Fig. 4: Geometry for calculation of the relative visits probability in absorption spectroscopy.

光源 - 検出間距離  $r$  の平均浸透深さ  $\langle z \rangle_r$  は次式によって表される。

$$\langle z \rangle_r = \frac{\int_V \Phi(\rho, z) E(\rho, \theta, z, r) z dV}{\int_V \Phi(\rho, z) E(\rho, \theta, z, r) dV} \quad (13)$$

ここで、積分強度 (fluence rate)  $\Phi(\rho, z)$  と脱出関数 (escape function)  $E(\rho, \theta, z, r)$  は、それぞれ以下の式によって与えられる。

$$\Phi(\rho, z) = \frac{1}{4\pi D} \left( \frac{\exp\{-\mu_{eff} [(z - z_0)^2 + \rho^2]^{1/2}\}}{[(z - z_0)^2 + \rho^2]^{1/2}} - \frac{\exp\{-\mu_{eff} [(z + z_0 + 2z_e)^2 + \rho^2]^{1/2}\}}{[(z + z_0 + 2z_e)^2 + \rho^2]^{1/2}} \right) \quad (14)$$

$$E(\rho, \theta, z, r) = \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{z \exp(-\mu_{eff} k)}{k^2} \left( \mu_{eff} + \frac{1}{k} \right) - \frac{z_p \exp(-\mu_{eff} l)}{l^2} \left( \mu_{eff} + \frac{1}{l} \right) \right] \quad (15)$$

$$k^2 = (r - \rho \cos \theta)^2 + \rho^2 \sin^2 \theta + z^2 \quad (16)$$

$$l^2 = (r - \rho \cos \theta)^2 + \rho^2 \sin^2 \theta + (z + 4DA)^2 \quad (17)$$

図 5.6 にプローブの表面が黒と白の場合における平均浸透深さの計算結果を示す。

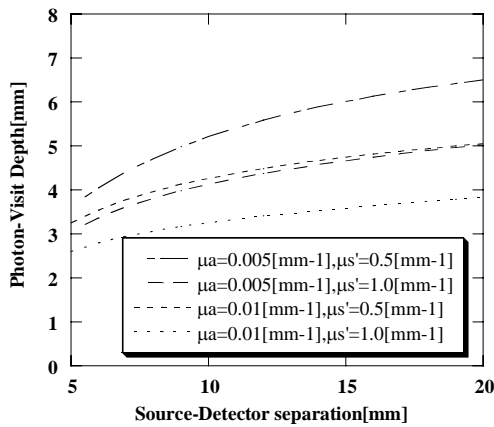
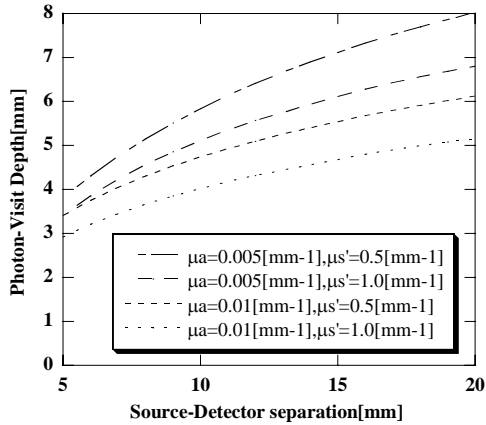


Fig. 5: The photon visit depth for the probes with black (top) and white (bottom) surfaces (parameter  $\mu_a, \mu_s'$ ).

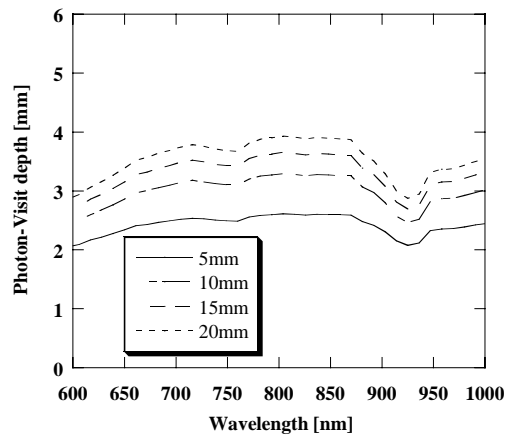
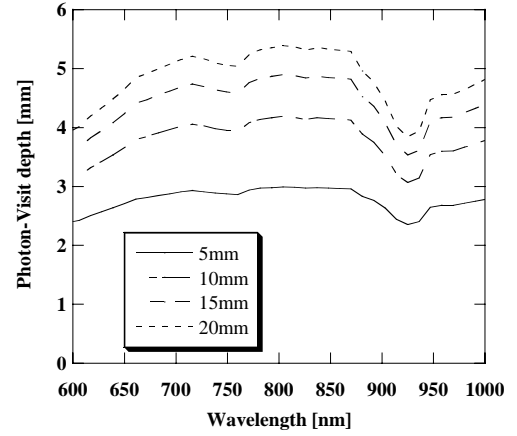


Fig. 6: The photon visit depth for the probes with black (top) and white (bottom) surfaces (parameter wavelength).

吸収係数、等価散乱係数による変化(図 5)

光源 - 検出間距離が長くなるにしたがって浸透深さは大きくなり、表面が黒のほうが白に比べ深いことがわかる。また、 $\mu_s'$  と  $\mu_a$  がともに小さい方が浸透深さは大きくなっている。

波長による変化(図 6)

表面が白よりも黒のほうが光源 - 検出間距離の影響を受けやすいことがわかる。

#### 4. 実験

反射型パルスオキシメータを実現するために、反射型プローブを用いて実験を行った。パルスオキシメータの最重要課題は、波形変動幅が得られるかどうかということである。波形に変動がなければ脈拍数を求めることができないし、酸素飽和度を求めることもできない。よって以上の計算結果をもとに、実際に反射型プローブを試作し波形変動幅が得られるかどうか検討した。

図 7.8 に表面が黒と白のプローブを用いて掌と額で測定した波形を示す。グラフは、時間 10[s]における脈波であり、上が波長 880[nm]、下は波長 660[nm]の信号である。

これらの結果から得られる酸素飽和度は 98%であり、同時に測定した透過型の値と良く一致した。また、掌で測定した波形では表面が白のほうが波形の変動幅が大きいのに対し、額で測定した波形では表面が黒のほうが波形の変動幅が大きい。よって表面の色がどちらがよいかということは一概には言えない。

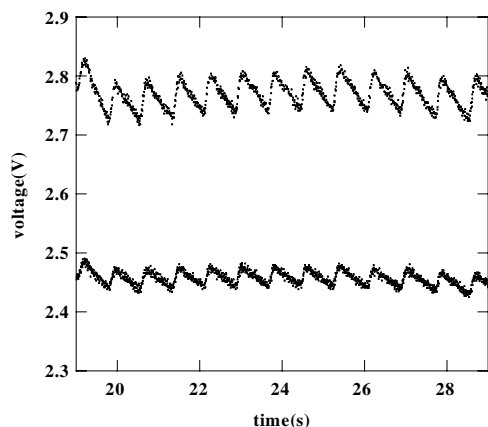
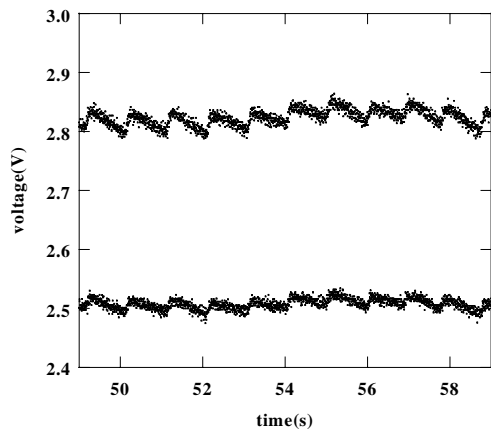


Fig. 7: Measured pulse waves at the palm of a hand using for the probes with black (top) and white (bottom) surfaces.

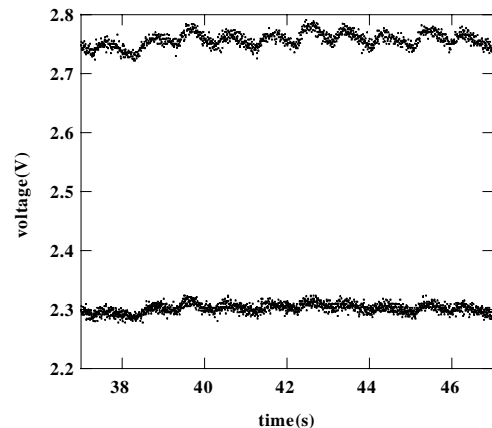
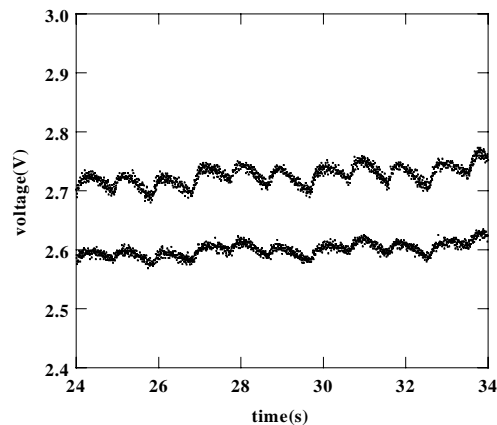


Fig. 8: Measured pulse waves at the forehead using for the probes with black (top) and white (bottom) surfaces.

## 5. 結言

本研究では、生体組織内光伝播の解析により、パルスオキシメータに対し、反射型と透過型プローブのモデルでの検出光強度の比較、光の浸透深さの検討を行った。表面が黒のとき、光の浸透深さは深いが出光強度は小さく、表面が白のとき、光の浸透深さは浅いが検出光強度は大きいということがわかった。また、計算結果をもとに反射型プローブを試作し実験を行い、パルスオキシメータの信号が得られることを確認した。

## 参考文献

- (1) Thomas J. Farrell, Michael S. Patterson, Brian Wilson: *A diffusion theory model of spatially resolved, steady-state diffuse reflectance for the noninvasive determination of tissue optical properties in vivo*, Medical Physics Vol.19, No.4, Jul/Aug (1992)
- (2) Michael S. Patterson, Stefan Andersson-Engels, Brian C. Wilson, and Ernest K. Osei: *Absorption spectroscopy in tissue-simulating materials: a theoretical and experimental study of photon paths*, APPLIED OPTICS Vol.34, No.1, January (1995)
- (3) Michael S. Patterson, B. Chance, and B. C. Wilson: *Time resolved reflectance and transmittance for the noninvasive measurement of tissue optical properties*, APPLIED OPTICS Vol.28, No.12, June (1989)
- (4) John G. Webster: *Design of Pulse Oximeters*, Inst. of Physics Pub. (1997)
- (5) Anna Zourabian, Andy Siegel, Britton Chance, Nirmala Ramanujan, Martha Rode, David A. Boas, *Trans-abdominal monitoring of fetal arterial blood oxygenation using pulse oximetry*, Journal of Biomedical Optics 5(4), 391-405 (October 2000)
- (6) Keisuke Matsushita, Kazuo Aoki, Yukio Yamada: *Fundamental study of reflection pulse oximetry*, Asian Symposium on Biomedical Optics and Photomedicine, Sapporo (2002)
- (7) 松下圭介, 青木一男, 角田直人, 山田幸生, *反射型パルスオキシメータの基礎研究* 日本機械学会第 15 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集 (2003)