［B20］近赤外光を用いた光イメージング法の研究

知能機械工学科　　山田研究室
0014038　　倉増大士

1.　緒言

近年無侵襲の脳機能計測技術が注目されている。その中でも MRI,PET といった従来機器の欠点を克服するものとして期待されているのが光イメージングである。光イメージングは近赤外光を用い、血液中の酸素飽和度の変化によってヘモグロビンの吸光スペクトルが変化することを利用している。光イメージングの利点は無侵襲かつ小型であり、拘束性が非常に低いという点にある。様々な状況下で計測が可能であり、医療、教育分野など多方面での応用が期待できる非常に有用な技術といえる。しかし、近赤外域の光にとって皮膚は吸収体であり、頭蓋骨は強散乱体である。これらの光学特性値がデータ、画像にどのような影響を与えるかはまだ十分にはわかっていない。検出された光から有益な情報を得るためには生体内での光伝播の様子を知ることが必要不可欠である。本研究では、生体に模したモデル内部での光伝播をシミュレーションを通して理解することを目的とする。

2.　光拡散方程式

媒体が光学的に十分厚いと考えられ、等方散乱近似が成り立つと仮定すると、媒体内での光の伝播を表す光拡散方程式は次式で与えられる。

$$\frac{1}{c}\frac{\partial \phi(r,t)}{\partial t} = \nabla \cdot D(r)\nabla \phi(r,t) - \mu_a \phi(r,t) + q(r,t) \tag{1}$$

r は媒体中の位置を表す。$\phi(r, t)$ [W/mm^2]は時間依存の積分強度であり、$D(r)$ [mm]は拡散係数、c[mm/ps]は光速、q[W/mm]は媒体内部での光強度、 μ_a[mm^{-1}]は吸収係数である。また、均質な 3 次元媒体では拡散係数は次式のように定義される。

$$D = \frac{1}{3\mu_s'} = \frac{1}{3(1-g)\mu_s} \tag{2}$$

このとき μ_s[mm^{-1}]は散乱係数であり、g は非等方散乱パラメータ（一回の散乱における散乱角の余弦平均）、 μ_s'は等価散乱係数（十分な厚さを持った媒体中で光が数回散乱していると仮定した場合、その散乱を等方散乱として近似したときの散乱係数）である。均質な 2 次元媒体の場合、分母は 2μ_s'となる。

入射面において入射点での境界条件は次式で与えられる。

$$\phi = -2AD\frac{\partial \phi}{\partial n} + \frac{4}{1-r_d}I \tag{3}$$

n は表面に垂直な外向きの方向を表す。r_d は屈折率比 n_{rel} によって決まる反射率で、A は r_d により決まる。I は入射光の強度を表す。入射点以外の入射面の境界条件は、(3)式で I=0 としたもので与えられる。入射面以外の境界条件は完全吸収条件 ϕ=0 を用いた。

3.　数値計算モデル

均質な 2 次元媒体において、照射光が連続光であり内部発光はないとして、媒体内の光伝播を計算した。計算には差分法を用いた。

連続光を考えているので、強度の時間変化は無く、時間微分項は 0 となる。また内部発光は考えないので q は 0 となる。よって(1)式は次式のように簡略化される。

$$0 = D\nabla^2\phi(r) - \mu_a\phi \tag{4}$$

今回用いた 2 次元媒体の計算モデルを図 1 に示す。光は入射表面の中心から入射し、強度は 1W/mm である。x[mm]は入射点を 0 とし、深さ z[mm]は入射面を 0 とする。実際の計算では、対称性より入射点から片側のみを考える。分割数は x 方向に 50、z 方向に 100 とした。格子間隔はそれぞれ 1mm、0.5mm となる。光学特性値は生体組織を想定して決定した。用いた光学特性値を表 1 に示す。

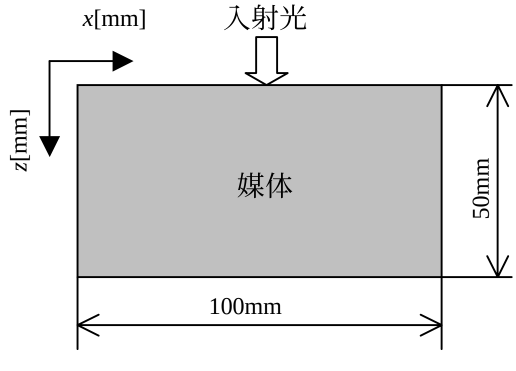

図 1.2 次元の計算モデル

表 1.光学特性値

μ_a[mm^{-1}]	0,0.005,0.05
μ_s[mm^{-1}]	15
g	0.9
μ_s’ [mm^{-1}]	1.5
n_{rel}	1.375

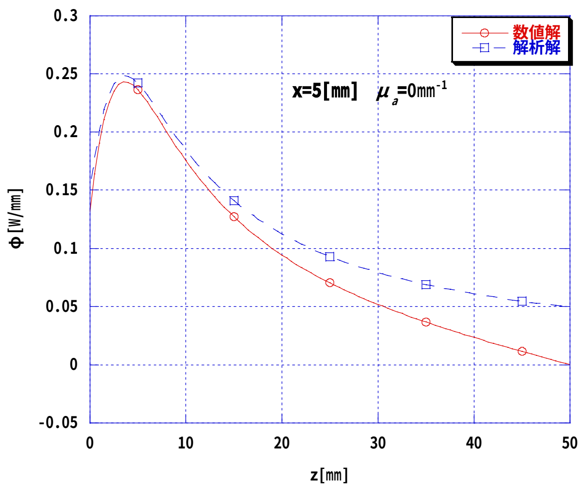

図 2.　2 次元定常状態吸収なしの数値解と解析解

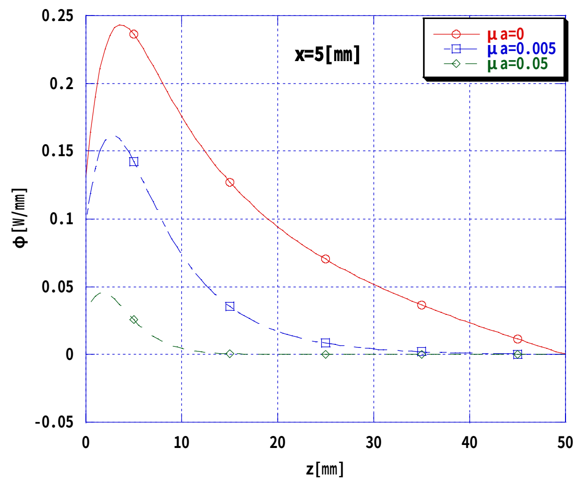

図 3.　吸収係数 μ_a を変化させた数値解

4.　数値計算結果

計算結果を図 2～4 に示す。図 2 は 2 次元定常状態吸収なしの場合の数値解と解析解の比較、図 3 は吸収係数 μ_a を変化させた数値解の比較、図 4 は吸収なし 2 次元解析解と 3 次元解析解の比較である。光源からの距離は全て 5mm である。また、数値解を可視化した結果を図 5 に示す。

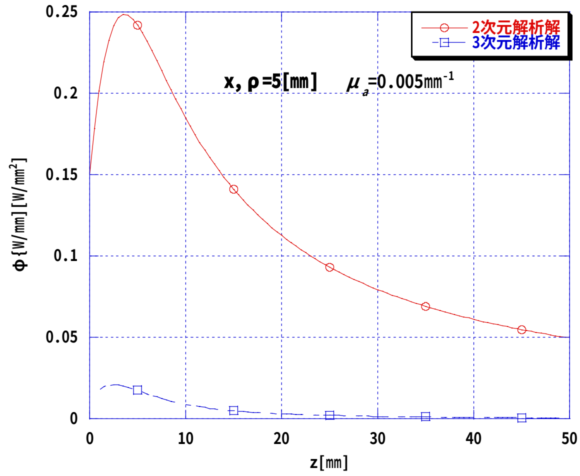

図 4.　吸収なし 2 次元解析解と 3 次元解析解

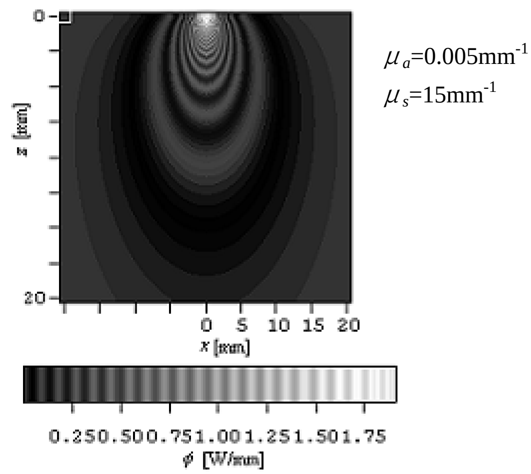

図 5.　数値解の可視化

入射面以外の面においては、境界条件が異なるため境界付近の解析解との差はあるが、図 2 において数値計算結果は解析解と良く一致した。図 3 は吸収係数変化による光伝播の変化を良く表しているといえる。なお、吸収がある場合の 2 次元解析解は変形 Bessel 関数により構成されることがわかった。図 4 より、3 次元解析解は 2 次元解析解に比べて光強度の減衰が大きいことがわかる。また、図 5 の可視化により光の経路を求めることが可能となる。

5.　結論

数値解は、境界条件の工夫によりさらに解析解に近い値が求められると考えられる。光学特性値の変化による 2 次元定常状態の光伝播の様子が計算で良く現れており、傾向がわかった。2 次元の解析解については吸収が存在する場合は、変形 Bessel 関数により構成されることがわかった。そして、層状構造および 3 次元の媒体についてシミュレーションを行うことは今後必要不可欠であるといえる。