

[B05] 可視光および近赤外光の皮膚における光伝播

機械制御工学科 山田研究室
9813008 飯野賢治

1. 序論

現在、インスリン注射に依存する糖尿病患者は一日数回の採血による血糖値測定を余儀なくされている。侵襲的な採血に伴う苦痛の軽減と連続的な血糖値測定のために、無侵襲的血糖値測定システムが望まれている。

現在、近赤外光を用いた無侵襲的血糖値測定システムの開発が行われている。近赤外光は生体に対して吸収が弱く透過しやすいため生体計測でよく使われている。しかし、生体は近赤外光を強く散乱する媒体でもあるためその中の光伝播を知ることは容易ではない。

近赤外光を用いて、無侵襲的な血糖値測定システムを開発するには、生体(皮膚)に照射した近赤外光が、どのような経路を通過して、どのような部分の情報を持って検出されているのかを知る必要がある。そこで本研究は Monte Carlo 法を使って近赤外光が皮膚内をどのように伝播しているのかを調べることを目的とする。

2. 解析対象

皮膚の構造は表皮・真皮・皮下組織の3層構造になっている。真皮層に毛細血管が発達しており、この部分を通過した光のスペクトルを選択的に測定することで精度のよい血糖値測定が可能となる。

表皮は非常に薄く表皮が光伝播に与える影響は大きくない。そこで本研究では図1のように表皮・真皮を一つの層とみなし、皮膚層と皮下組織層からなる2層構造のモデルを考える。各々の層は平面方向には無限に広がっているとし、皮下組織の下には光をよく吸収する筋肉の層があるため、本研究では皮下組織の下には完全吸収体があるものとみなした。

近赤外光を用いた血糖値測定システムでは波長が1000nm~1500nmの近赤外光がよく用いられる。

この波長領域における皮膚層の光学特性値は Tamara L. Troy *et al*¹⁾ の測定結果と C Rebecca Simpson *et al*²⁾ の測定結果を使用した。また、皮下組織層の光学特性値は脂質の一種であるコレステロールの値を用いた。本研究で使用した光学特性値を図2に示す。ただしグラフ中の非等方散乱パラメータは、皮膚層の値を示す。皮下組織層の非等方散乱パラメータは波長によらず0.9とした。皮膚層、皮下組織層の屈折率はともに1.37とした。

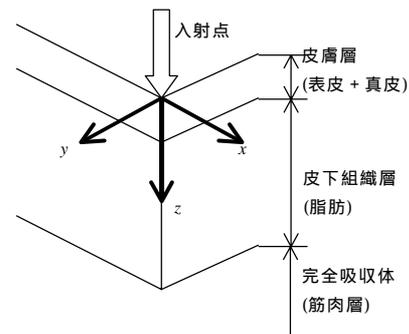


図1 皮膚の構造

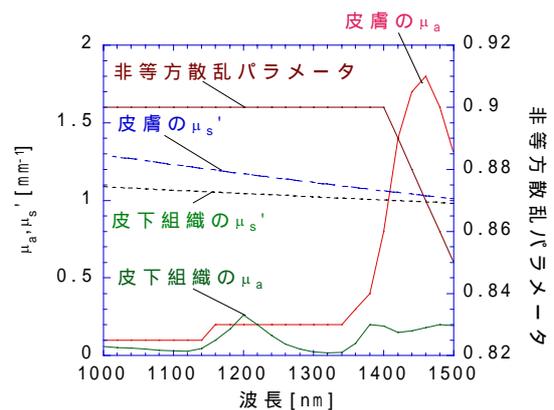


図2 光学特性値

3. 計算結果と考察

Monte Carlo 法に基づいた Wang *et al*³⁾ のプログラムを改良し、各層ごとの平均光路長を計算した。

入射・検出に使用する光ファイバーのコア径は0.35mmとした。

図3に皮下組織層の厚さを10mm、入射・検出器間距離を0.65mmと固定し皮膚層の厚さを1.0mm~3.0mmまで変化させたときの計算結果を示す。パラメータは皮膚の厚さを表している。図4に皮膚層の厚さを1.0mm、入射・検出器間距離を0.65mmと固定し、皮下組織の厚さを2.0mm~14mmまで変化させたときの計算結果を示す。パラメータは皮下組織層の厚さを表している。図5に皮膚層の厚さを1.0mm、皮下組織層の厚さを10mmと固定し、入射・検出器間距離を0.0mm~0.65mmまで変化させたときの計算結果を示す。パラメータは入射・検出器間距離を表している。図6に皮膚層の厚さを

1.0mm、皮下組織層の厚さを 10mm、入射・検出器間距離を 0.65mm と固定し、検出用光ファイバーの開口数 (NA) を 0.3 ~ 1.2 まで変化させたときの計算結果を示す。パラメータは NA を表している。(a)に全光路長、(b)に全光路長のうち皮膚層での平均光路長が占める割合を示した。

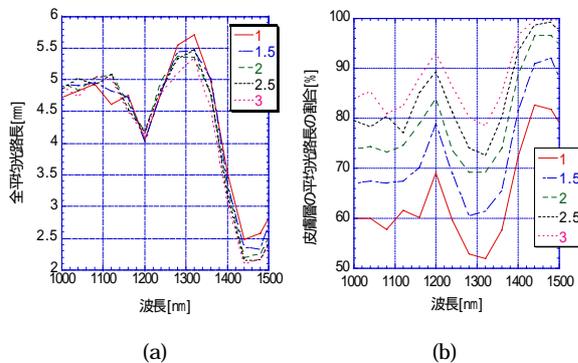


図 3 皮膚層の影響

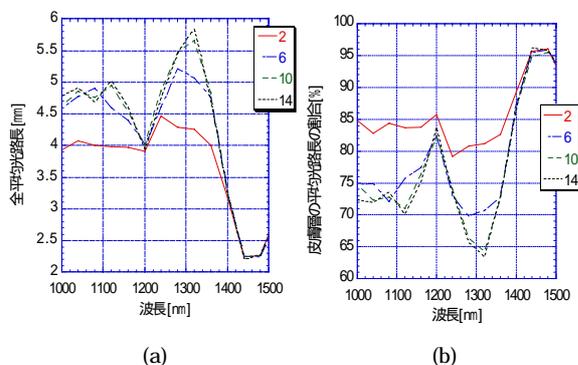


図 4 皮下組織層の影響

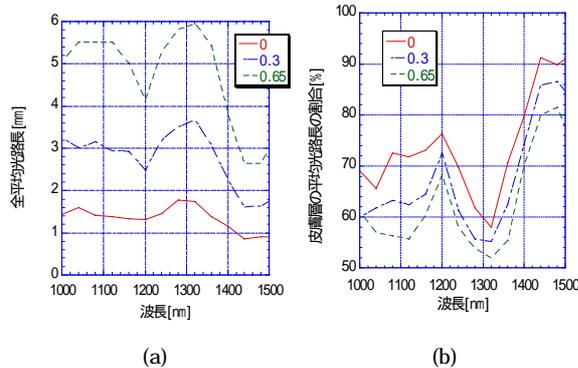


図 5 入射・検出器間距離の影響

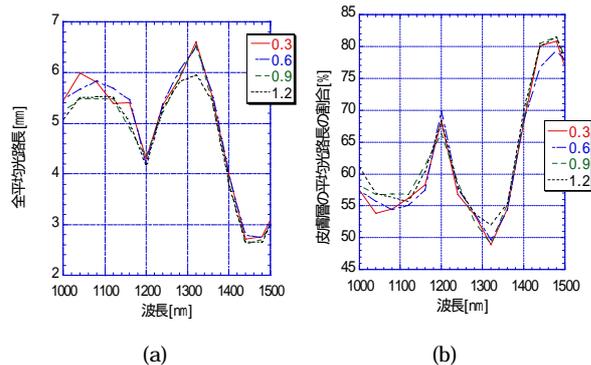


図 6 検出用光ファイバー開口数の影響

皮膚層と皮下組織層の吸収係数のピークの波長で、全平均光路長が減少していることから、媒体の吸収の強さが光路長に影響を与えていることがわかる。

図 3 から皮膚層の厚さは、全光路長に大きな影響を与えていないことがわかる。全平均光路長のうち皮膚層での平均光路長が占める割合は皮膚層が厚いほど大きくなるのがわかった。皮膚層が厚いほど皮膚層を通過する光が多くなり、逆に皮下組織層にまで到達する光が少なくなるためだと考えられる。

図 4 から吸収の大きい波長領域では皮下組織層の厚さが及ぼす平均光路長への影響は小さいことがわかる。吸収の小さな波長領域では皮下組織層の影響が見られる。皮下組織層が薄いほど皮下組織層を通過し完全吸収体にまで到達してしまう光が多くなり、その分皮下組織層での平均光路長が小さくなるのが原因であると考えられる。皮膚層での平均光路長には皮下組織層の厚さによる影響は見られなかった。

図 5 から入射・検出間距離が大きくなると、全光路長が大きくなり、皮膚層での平均光路長が占める割合が小さくなるのがわかる。入射・検出間が大きくなると、より深くまで光が浸透するためだと考えられる。

図 6 から検出用光ファイバーの開口数は平均光路長に大きな影響を与えないことがわかる。光が検出されるときには散乱が等方的になっているのではないかと考えられる。

4. 結論

皮膚内での光伝播の様子を定量的に調べるために平均光路長の計算を行った。

皮膚層の厚さ、皮下組織層の厚さ、入射・検出器間距離、検出用光ファイバーの開口数が、検出される光の平均光路長にどのような影響を与えているのかを示した。

今後は、平均光路長だけでなく光が浸透する深さに関して定量的な解析を行う必要がある。

5. 参考文献

- 1) Tamara L. Troy, Suresh N. Thennadil: "Optical properties of human skin in the near infrared wavelength range of 1000 to 2200nm" Journal of Biomedical Optics 6 (2), 167-176 (April 2001).
- 2) C Rebecca Simpson, Matthias Kohl, Matthias Essenpreis, Mark Cope: "Near-infrared optical properties of *ex vivo* human skin and subcutaneous tissues measured using the Monte Carlo inversion technique" Phys. Med. Biol. 43(1998) 2465-2478.
- 3) Lihong Wang, Ph. D. Steven L. Jacques, Ph. D.: "Monte Carlo Modeling of Light Transport in Multi-layered Tissues in Standard C", Laser Biology Research Laboratory, University of Texas M. D. Anderson Cancer Center (1992).