

学位論文題名

光拡散方程式の拡散係数および

適用条件に関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

本研究は、散乱・吸収媒質中の光の挙動を光拡散方程式を用いて解析する際の拡散係数の形式および適用範囲について、研究成果をまとめたものである。

近年、生体色素の可視から近赤外光領域での分光学的性質を利用した光生体計測の研究がさかんである。しかし生体組織はその領域の光に対する強散乱媒質であるため組織中の光の伝搬経路は非常に複雑なものとなり、通常の Beer-Lambert 則をそのまま適用したのでは正確な分光学的情報は得られない。この問題を解決するため、輸送方程式を利用した強散乱媒質中の光伝搬の解析が行われてきた。しかし、一般に輸送方程式は解析的にも数値的にも解くことは困難であるため、輸送方程式から拡散近似を用いて導出した光拡散方程式が多くの研究者によって使用されている。

従来の光拡散方程式は吸収係数 μ_a が等価散乱係数 μ_s' より十分に小さいという前提のもとで導出されており、方程式中の拡散係数は $\{3(\mu_a + \mu_s')\}^{-1}$ で与えられる。一方、Nomura、Hasegawa らの研究グループから、 μ_a と μ_s' の大きさにかかわらず拡散係数が $(3\mu_s')^{-1}$ で表わされるとの実験結果およびシミュレーション結果が発表されており、従来の光拡散方程式との矛盾点が議論をよんでいた。ところが、最近 Furutsu らにより輸送方程式から新たな考えに基づいた光拡散方程式が導出され、その拡散係数は $(3\mu_s')^{-1}$ で表されている。これは上記の研究グループの主張を理論面から支持するものであるが、これまでに行われた実験およびシミュレーションは吸収係数が等価散乱係数に比べて十分小さい領域で行われたものであるため、いずれの形式の光拡散方程式が現実をより正しく記述しているかを検証することはできない。

本研究では高感度な測定系を用いて、吸収係数が大きな条件下で実験を行うことで、拡散係数を $(3\mu_s')^{-1}$ とする光拡散方程式の正当性を明らかにし、その適用範囲について考察を行った。以下に本論文の要旨を示す。

第1章では、研究の背景と目的について述べた。

第2章では、媒質の光学パラメータの測定法ならびに光伝搬のモデルについて議論し、輸送方程式からの光拡散方程式の導出法を示した。散乱・吸収媒質の絶対的な分光学的情報を手に入れるためには媒質中の光の伝搬に関する知識が不可欠である。そこで、光の伝搬を解析するためのモデルとしてモンテカルロ法、ランダムウォーク法、光拡散方程式を取り上げ、それぞれの利点と問題点について議論を行った。

第3章では、光源からの距離について、光拡散方程式の導出に使用した近似が成立する範囲を求め、成立しない場合に測定値が受ける影響を定量的に議論した。その結果、光源からの距離が輸送平均自由行程の10倍以内では、実測値は光拡散方程式とは一致しないことが示された。

第4章では、吸収係数が散乱係数の1/3程度以下という条件下で従来の光拡散方程式、Furutsuらにより導出された光拡散方程式、および実験結果の比較を行った。これによって、光拡散方程式の拡散係数には吸収係数は含まれず、散乱・吸媒質中で微視的なBeer-Lambert則が成り立つことを検証した。

第5章では、媒質の吸収係数と光を入射してからの経過時間について、光拡散方程式の導出に使用した近似が成立する範囲を求め、成立しない場合に測定値がどのような影響を受けるかを定量的に議論した。その結果、媒質にパルスを入射してから数十psの間は光拡散方程式の正しさは保証されず、その影響は吸収係数が高いほど大きいことを示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 本 克 之
副 査 教 授 清 水 孝 一
副 査 教 授 栗 城 眞 也
副 査 教 授 田 村 守 (理学研究科)

学位論文題名

光拡散方程式の拡散係数および 適用条件に関する基礎的研究

近年、ヘモグロビンやチトクローム等の生体色素の分光学的性質を利用した光生体計測の研究が盛んである。生体組織などの散乱吸収媒質中の光伝搬の解析には光拡散方程式が多用されるが、最近Furutsuらによって従来とは異なる定義の拡散係数が提案され、その正当性、物理的意味等が議論されている。

本論文はこのような背景のもとに、実験およびモンテカルロシミュレーションにより、従来の光拡散方程式とFurutsuらによる光拡散方程式のいずれが実際の光拡散現象をより正しく表現しているかを検討したものである。さらに、光拡散方程式を導出する際に用いられる各種近似の適用条件についても検討を行っている。光拡散方程式の拡散係数の形式の違いおよび近似の適用範囲は、拡散光を用いた各種応用計測を考えると、その精度に大きく影響を及ぼすため、本論文の研究結果は今後の拡散光計測分野に有益な知見を与えるものである。本研究の主な成果は以下の点に要約される。

1. 定常光を用いた高感度な測定系により、従来困難とされた高吸収媒質中の拡散係数の実測に成功している。その結果、光拡散方程式における拡散係数の形式は、吸収係数を μ_a 、等価散乱係数を μ_s' とし、従来から用いられてきた $\{3(\mu_a + \mu_s')\}^{-1}$ ではなく、Furutsuらが提案する $(3\mu_s')^{-1}$ であることを、初めて実証している。
2. 光拡散方程式では、光源を等方性の点光源と近似するため、実際の光源に異方性がある場合には、光源に近い領域で光拡散方程式の解と実際の光拡散現象は一致しなくなる。代表的な散乱・吸収媒質である生体組織に対しては、光ファイバ等の異方性の強い光源が用いられるため、異方性の影響が及ばない範囲で測定を

行う必要がある。本論文では、光ファイバを光源とする散乱・吸収媒質に対して実測及びモンテカルロシミュレーションによる解析を行い、等方光源の近似成立条件として、低吸収媒質では光源からの距離が光子輸送平均自由行程の約10倍以上でなければならないこと、高吸収媒質になるにしたがい光源に近い位置まで近似が成立するという知見を得ている。

3. 光源が等方的であっても、光源からの距離が媒質の輸送平均自由行程程度か、それより小さい場合には、散乱回数が少ないため拡散近似が成立せず、光拡散方程式は実際の光拡散現象を正しく記述できないことをモンテカルロシミュレーションによって確認している。
4. 媒質の吸収係数が散乱係数の数分の一を超えると、Furutsuらによる光拡散方程式によっても実際の定常光強度を記述できないことを実験的に見い出している。また、その原因をインパルス光の光伝搬解析との比較より検討し、光拡散方程式導出時の近似条件に由来することを示唆している。さらに、吸収係数が大きいほどその影響は顕著になるとの結果を得ている。

これを要するに、著者は、光吸収・散乱現象を記述する光拡散方程式の拡散係数の新たな定義を実験的に初めて検証し、その近似の適用条件についても新知見を得たものであり、生体光計測工学の分野に貢献するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。