

令和 3 年 5 月 14 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13694

研究課題名（和文）生体の大域・局所構造に起因したふく射の干渉機構の解明と光散乱特性の理論値導出

研究課題名（英文）Study of interference of the radiative transfer induced by local and global structures of biological tissues and development of theoretical calculations of the light scattering properties

研究代表者

藤井 宏之（Fujii, Hiroyuki）

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号：00632580

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、生体模擬溶液である高密度なコロイド水溶液（水分子よりも大きなコロイド粒子が水に分散している溶液）を考え、光の散乱特性について理論、計算、実験より調べた。特に、コロイド粒子の濃度が高い場合に生じる、ふく射の干渉効果に着目し、干渉効果が及ぼす光散乱特性の影響について解析した。先行研究で考慮されていなかった粒径分布を厳密に取り入れた干渉効果に関する理論を電磁波散乱理論に基づいて構築し、粒径分布が干渉効果や散乱特性に強く影響を及ぼす条件を数値計算より評価した。また、反射光強度の時間分解計測を実施し、干渉効果を実験的に観察され、数値計算結果と定性的に一致していることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近赤外の波長帯域の光を用いた生体深部イメージングや治療において、生体内にどのように光が伝播しているのか予測することが重要である。光伝播の理解のためには、光の散乱や吸収を定量化する光学特性値（散乱特性と吸収特性）を、生体の各部位にて高精度に算出する必要がある。基礎研究として、生体模擬溶液である高密度なコロイド水溶液の光散乱特性を調べることが重要である。本研究では、従来考慮されていなかった粒径分布を考慮したふく射の干渉効果に関する理論を構築し、粒径分布による散乱特性への影響について明らかにした。本研究の成果は、散乱光を用いた生体深部イメージングの開発において有用な知見である。

研究成果の概要（英文）：This study considered dense colloidal suspensions in water as optical phantoms of biological tissues, and examined the light scattering properties in the colloidal suspensions by numerical calculations for the electromagnetic scattering and radiative transfer theories, and by light reflectance measurements based on the time-correlated single photon counting system. Especially, we investigated the light interference effects on the scattering properties in the suspensions at different volume fractions from 0.1 to 20%. We developed a theory of the interference effects in polydisperse systems based on the electromagnetic theory, while a conventional theory of the interference effects can not fully treat the polydispersity. Our numerical calculations showed conditions where the interference strongly influences the scattering properties. Time-resolved light reflectance measurements supported our numerical results.

研究分野：熱工学（熱輻射）

キーワード：生体内光伝播 ふく射輸送理論 光学特性値 近赤外光イメージング 干渉効果 電磁波散乱理論

1. 研究開始当初の背景

生体に対する光診断・治療技術が開発されている。光診断・治療において、特定の領域に適量の光が達していることが重要であり、生体内部の光伝播を定量的に把握することが重要である。光伝播の理解のために、生体組織における光学特性値(吸収係数、散乱係数、異方性因子など)を正確に算出することが求められる。生体に光を照射すると、光は吸収や散乱を繰り返しながら生体の深部へと伝播し、その度合いは光学特性値によって表される。光学特性値は、部位(筋肉や骨など)や状態(正常や病変)によって異なり、吸収係数と生体組織の化学組成(ヘモグロビンなど)との関係性、そして光散乱特性(散乱係数や異方性因子)と構造特性(分子配列など)との関係性に起因している。光学特性の実測値は、光計測データを光伝播モデルに基づいて逆解析することによって算出される。逆解析では、光学特性値を有した連続体としてのランダム媒体として生体を捉え、光をエネルギー粒子としてのふく射と捉えた、ふく射輸送理論が適用されている。光伝播モデルとして、ふく射輸送方程式や光拡散方程式が使用されている。これまでに様々な生体組織における光学特性の実測値が算出され、データベース化されているが、文献によってその値は異なっている場合が多く、実測値の妥当性を検証する必要性が高まっている。しかし、上記のふく射輸送論に基づいた光伝播モデルにおいて、光学特性値はパラメータ値であるため、ふく射輸送論の枠組みだけでは算出値の妥当性を検証することは非常に難しい。従って、ふく射輸送論よりも微視的な時間・空間スケールの光伝播を記述する Maxwell 方程式に基づき、光学特性値の理論値を導出することができれば、妥当性検証において有用である。近赤外の波長帯域における生体内の光伝播は、吸収過程よりも散乱過程が主体であることから、光散乱特性の理論値を求めることが重要である。生体における光散乱特性の理論値は未だ求められていないが、生体模擬溶液(コロイド溶液や高分子溶液)における光散乱特性が研究されている。溶液の光散乱特性における基礎的な知見が得られているものの、限定的であり、主に粒径分布を考慮しない理論によって解析されている。

逆解析による高精度算出のためには、光伝播モデルを高精度に計算することが必要である。生体は光を強く前方に散乱させるため、ふく射輸送方程式の位相関数は散乱角が小さい領域において鋭い波形を有している。このような強い前方散乱性を有した場合のふく射輸送方程式を高精度かつ高効率に計算することが重要であり、様々な手法が開発されているが、更なる改良が求められている。計算手法の開発には、強い前方散乱性が光伝播に強く影響を及ぼす時間と空間スケールを明らかにすることが重要である。

2. 研究の目的

本研究では、生体模擬溶液に対して、光の干渉理論に基づいて、生体組織における光散乱特性の理論値を導出すること、そして、溶液の局所的・大域的な構造特性に起因した光の干渉機構を解明することを目的とした。特に、高分子溶液に着手する前に、球状のコロイド溶液における干渉機構を明らかにすることを目的とした。また、強い前方散乱性を有したランダム媒体におけるふく射輸送方程式を高速かつ高効率に計算する手法を開発すること、そして、光散乱の時空間スケールをふく射輸送論より明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 溶液における干渉散乱理論の導出

単分散・多分散のコロイド溶液の構造特性(静的構造因子や動径分布関数)を Percus-Yevick モデルよりモデル化した。Percus-Yevick モデルによる構造特性は実験結果や分子動力学シミュレーション結果とも良い一致を示すことが知られている。多分散の場合には、Wigner-Hopf 分解に基づいて計算した。申請時の研究計画では、分子動力学シミュレーションで構造特性を計算するとしていたが、コロイド溶液の構造特性に対する様々な解析解が提案されていることを後に認識したため、今回は解析解を適用した。

Maxwell 方程式を散乱次数で展開した Foldy-Lax 方程式から干渉散乱理論を単分散・多分散において導出した。干渉散乱理論において、単一粒子の散乱には Mie 理論を適用し、静的構造因子には Percus-Yevick モデルの結果を用いた。また、干渉散乱理論における干渉項を除くことで、独立散乱理論を計算した。MATLAB をベースに計算コードを作成した。

波長については、実際の光計測で使用される 759 nm に固定し、体積分率を 0.1% から 20% まで変化させた。また、粒径については、シリカ溶液(Psi-0.5, Kisker Biotech, Steinfurt, Germany)やイントラリピッド溶液 w10%(Kabivitrin, Stockholm, Sweden)の文献値を用いた(V.

D. Nguyen et al., Opt. Express, 2013; H. J. V. Staveren, et al., Appl. Opt., 1991)。単分散では、粒径分布の平均値を用いた（シリカ溶液では 1213 nm、イントラリピッド溶液では 97 nm）。各体積分率と粒径に対して、干渉散乱理論より光散乱特性（位相関数、散乱係数、異方性因子、換算散乱係数）を数値計算した。干渉効果が及ぼす光散乱特性への影響について数値解析した。

（ 2 ）光伝播のマルチスケールモデルの構築

干渉散乱理論と独立散乱理論より計算した光散乱特性をふく射輸送方程式や光拡散方程式に組み込み、マルチスケールの観点から、積分光強度の時間分解波形を数値計算した。ふく射輸送方程式や光拡散方程式の計算には、3次元無限媒体の解析解を適用した。ふく射輸送方程式の解析解について、Liemert-Kienle によるオープンソース(A. Liemert and A. Kienle, Biomed. Opt. Express, 2012)をベースとし、位相関数の計算部分については、オリジナルの Legendre 展開法から delta-Eddington 展開法へと修正することで精度を向上させた。吸収係数は体積分率には依らず、0.1/cm とした。光源と検出点間距離について、拡散近似が成立せず、位相関数の形状が計算結果に大きく影響を及ぼす条件とした。体積分率によって、この条件は変化することから、各体積分率に対して光源 検出点間距離を変更した。

干渉散乱理論と独立散乱理論によるふく射輸送方程式の数値計算結果を比較し、干渉効果が及ぼす光伝播への影響について数値解析した。積分光強度の時間分解波形のピーク値を基準にした時間幅に対して相対誤差を評価した。

位相関数として、先行研究で広く使用されている Henyey-Greenstein 関数を用いたふく射輸送方程式の計算結果と、干渉散乱理論により計算した位相関数を用いた場合の結果と比較し、位相関数の形状による光伝播への影響について解析した。Henyey-Greenstein 関数は異方性因子をパラメータとする数理モデルであり、異方性因子の値として干渉散乱理論の結果を用いた。

（ 3 ）反射光強度の時間分解計測

単一光子時間分解計測法による計測システムを研究協力者の西村吾朗助教（北海道大学、電子科学研究所）よりお借りして、溶液の反射光強度の時間分解計測を実施した。波長可変レーザー(Ti:Sapphire)を用いて、波長を 759 nm に固定した。繰り返し周波数は 80 MHz であるが、カウンターの取りこぼしを防ぐため、AOM(Acoustic optical modulator)より 8 MHz に間引いている。レーザー光をスプリッターで 99:1 に分け、99 の方を実験試料に入射した。試料内を伝播した光を SPAD(Single photon avalanche photodiode)で検出した。1 の方はさらに 99:1 に分け、1 の方を PM(Power meter)にてモニタリングし、残りの 99 の方を検出光と混ぜた。2 つの光を混ぜることにより、時間軸の補正が容易となる。光は全て光ファイバーを通した。入射光ファイバーと検出光ファイバーを 3D プリンタで作製したホルダーで保持して、溶液の液面に水平に設置した。

光源-検出点を 1、2、3 cm に設定した。溶液はイントラリポス溶液 w10%（大塚製薬）を純水で希釈し、0.1%から 10%の濃度の試料を 3L 作製した。室温で遮光した実験室で計測を実施した。事前に、容器の側面の影響を調べ、光源と検出点が設置された面以外の面による光の反射や吸収の影響は検出光には殆ど影響しないことを確認した。

時間分解波形を逆解析し、換算散乱係数と吸収係数を算出した。光伝播モデル（順解析モデル）として光拡散方程式を適用し、境界面の反射と屈折を考慮した半無限媒体の解析解を用いた。解析解と装置関数（入射光）を畳み込み、検出光の計算データとした。逆解析モデルとして Levenberg-Marquardt 法を適用し、評価関数として Poisson ノイズを考慮した重み付き残差を用いた。

（ 4 ）光伝播の時空間スケールの数値解析

ふく射輸送方程式、M 次精度の delta-Eddington 方程式、光拡散方程式の解析解を用いて、積分光強度の時間分解波形の計算結果を比較し、光散乱の異方性の時空間スケールを解析した。Delta-Eddington 方程式は、ふく射輸送方程式の位相関数を展開したものであり、次数 M=0 の場合には、デルタ関数と等方散乱で位相関数を近似したもので、次数 M=1 の場合には、デルタ関数と 1 次の Legendre 関数で近似したものである。3次元無限媒体におけるふく射輸送方程式の解析解は Liemert-Kienle によるオープンソースを用いた。また、delta-Eddington 方程式の解析解はふく射輸送方程式の解析解をベースに構築した。3次元半無限媒体における解析解を、無限媒体の解析解と境界面の反射・屈折を拡散近似した Robin 型の境界条件を外挿法より導出した。

光源 検出点間距離を 0.15-10.0 cm まで変化させ、また、吸収係数、散乱係数、異方性因

子も変化させた。光学特性値の変化の範囲は、近赤外の波長帯域で算出されている生体部位や農産物の値を参考にした。

特性時間の一つである、積分光強度のピーク値を有する時間(ピーク時間)を解析した。光源 検出点間距離とピーク時間を光学特性値で規格化し、無次元解析を行った。

(5) 強い前方散乱性を有したランダム媒体におけるふく射輸送方程式の数値計算手法の開発

空間離散として、有限要素法に基づいたふく射輸送方程式の数値計算を2次元媒体において実施した。定常の場合、空間離散法はStreamline-upwind Petrov-Galerkin(SUPG)法、方向離散は台形公式、反復解法として、Bi-CGSTAB法を適用した。非定常の場合には、時間積分として後進Euler法を適用した。境界面における光の反射・屈折も考慮した。均一な円媒体で解析解と比較して精度を事前に確認した。2次元ヒト頸部モデルに対してふく射輸送方程式を数値計算した。ヒト頸部モデルは、筋肉、脂肪、骨を平均化した背景組織、血管、脊髄、脊椎、気管で構成され、成人女性のMR画像を解析し、各部位の空間領域を抽出したものである。各光学特性値は、先行研究の文献値を用いた。光拡散方程式の計算結果と比較し、拡散近似が成立する時空間領域について検証した。C++で計算コードを作成し、ワークステーション(24 thread, Intel Xeon X5690 at 3.47 GHz)を用いて実施した。

3次元媒体において、二重指数関数法に基づいて強い前方散乱性を考慮する位相関数の重みづけ方法を開発した。開発手法の汎用性を検証するため、異方性因子を0.5から0.9まで変化させ、複数種類の方向セット(台形公式、Level-symmetric、Even-odd、Levedevのセット)を用いた。空間離散法として3次精度のWENO法を適用し、時間発展として3次精度のTVD-Runge-Kutta法を適用した。開発した1次精度の重みづけ法によるふく射輸送方程式の計算結果と、従来の0次精度の方法による結果を比較し、必要な精度を検証した。計算精度は、Liemert-Kienleの解析解を用いて評価した。

4. 研究成果

(1) 干渉効果による光散乱特性や光伝播への影響

コロイド溶液の静的構造因子の散乱角依存性について、シリカ溶液とイントラリピッド溶液における計算結果は大きく異なった。シリカ溶液では複数のピークが観察され、体積分率が高くなると、ピークはより鋭くなった。これらのピークは、実空間の最近接距離、第二最近接距離などに対応する。一方で、イントラリピッド溶液では明確なピークは現れなかった。この相違は、粒径の違いにあると考えられた。粒径が小さい場合、静的構造因子の角度依存性は小さい傾向にあると考えられる。また、単分散と多分散の静的構造因子も大きく異なっていた。

干渉散乱理論による規格化された位相関数と独立散乱理論による位相関数の比較について、体積分率が低い場合、両者はほぼ一致した。一方で体積分率が高い場合、干渉散乱理論による位相関数では、前方散乱性が弱まることによって両者は異なった。単分散と多分散との比較では、シリカ溶液では相違は殆どなく、イントラリピッド溶液では大きく異なっていた。散乱係数と異方性因子の体積分率依存性について、体積分率が高くなると、干渉効果によって干渉散乱理論の結果は独立散乱理論の結果よりも小さくなった。体積分率が小さい場合には両理論の結果は一致するなど、その他については、位相関数の比較結果と同様な傾向であった。換算散乱係数について、散乱係数の相違と比べると、干渉散乱理論と独立散乱理論の相違は小さくなった。この相違の減少は、シリカ溶液の場合において、イントラリピッド溶液に比べてより顕著であった。この結果は予想外であったが、シリカ溶液の方が異方性因子の値が1に近いことが要因であると考えられた。これらの結果より、シリカ溶液では分散性を考慮する必要がないこと、一方で、イントラリピッド溶液では考慮する必要があることが示唆された。干渉効果が現れる時空間スケールについて、拡散近似が成立する拡散領域と比べて、光散乱の異方性が光伝播に影響を及ぼす散乱領域においてより明確に観察されると考えられた。干渉散乱理論の数値計算時間について、分散性を考慮すると、計算時間は数十倍に増加する。今後、計算精度と効率を両立させた干渉散乱理論の数値計算手法を開発することが重要となると考えられる。

干渉散乱理論と独立散乱理論による積分光強度の数値計算の比較について、両者の結果は高い体積分率の場合には異なり、干渉効果が散乱特性を通じて光伝播にも強く影響を及ぼすことが示唆された。また、位相関数よりも換算散乱係数を通じて、光伝播に影響を及ぼすことを明らかにした。散乱領域となる光源 検出点間距離や体積分率の範囲は非常に狭く、殆どの条件において拡散近似が成立していた。Henyey-Greensteinの位相関数と干渉散乱理論の位相関数を用いたふく射輸送方程式の計算結果の比較について、散乱領域である低い体積分率の場合、両者の大きな相違が観察された。しかし、散乱領域が狭いため、位相関数のモデル化による光伝播への影響は小さくなった。本研究では、異方性因子が正確に求められている場合を想定したが、異方

性因子が正しく推定されていない場合には、位相関数による光伝播への影響は大きい可能性もあり、今後の課題としたい。

光計測で得た反射光強度の時間分解波形は、各体積分率で大きく変化し、体積分率が高い場合、波形は時間的に広がっていた。これは、散乱が強くなり、光路長が大きくなったことを示す。逆解析により算出した換算散乱係数の体積分率依存性について、独立散乱理論で予想される線形関係では算出値は記述できず、干渉効果により、換算散乱係数値が線形予測値よりも小さくなった。実験値を定性的に記述するモデル式を指数関数に基づいて提案し、干渉効果を簡易的に記述することができた。光計測で用いているイントラリポス溶液の粒径分布について、北海道大学オープンファシリティにある動的光散乱法で計測したが、計測結果は他の測定装置による結果と異なっていた。確かな粒径分布を得ることができなかつたため、数値計算結果と直接比較することはしなかつた。この点について、今後の課題としたい。

(2) 光散乱の異方性に関する時空間スケールの数値解析

無限媒体における、ふく射輸送方程式、0 次の delta-Eddington(dE)方程式、光拡散方程式による積分光強度のピーク時間の比較について、0 次の dE 方程式と光拡散方程式の結果は殆ど等しく、同等の近似精度であると考えられた。0 次の dE 方程式では、前方散乱性が強い場合の位相関数をデルタ関数と等方散乱で近似しているため、等方散乱の近似である光拡散方程式の結果と一致したと考えられた。0 次の dE 方程式が成立する空間スケールは、換算輸送係数に基づいた特性長の 10 倍よりも長いスケール、時間スケールは特性時間の 40 倍よりも長いスケールであった。空間スケールは先行研究で評価された 2 次元媒体の結果と一致しているが、時間スケールは異なっていた。時間スケールのみ次元によっていると考えられ、興味深い結果となった。1 次の dE 方程式が成立する空間スケールは特性長の 4 倍、時間スケールは特性時間の 6.3 倍よりも長いスケールであり、2 次の dE 方程式が成立する空間スケールは 2.8 倍、時間スケールは 3.5 倍よりも長いスケールであった。3 次以上の dE 方程式の結果はふく射輸送方程式の結果とほぼ等しく、光散乱の異方性は dE の 3 次以上を考慮すれば十分な精度が得られた。3 次の dE による位相関数は元の位相関数と形状が異なっているが、ふく射輸送方程式の数値計算において、十分な精度が得られたことを意味する。よって、位相関数の形状そのものよりも位相関数のモーメントが、ふく射輸送方程式の計算結果において重要であると考えられた。この結果は予想外であったが興味深い。

半無限媒体における結果について、空間スケールは無限媒体の結果とほぼ等しくなる一方で、時間スケールは長くなった。境界条件の影響が空間スケールでは殆ど寄与せず、時間スケールに寄与することは、予想外であり、興味深い結果となった。

(3) 強い前方散乱性を有したランダム媒体におけるふく射輸送方程式の数値計算

有限要素法に基づいた定常系のふく射輸送方程式の数値計算では、ヒト頸部の気管境界面の光の反射・屈折は全体の光伝播へ強く影響を及ぼすことがなかつた。有限差分法に基づいた、非定常系のふく射輸送方程式の数値計算結果では、気管境界面での反射・屈折が光伝播へ強く影響を及ぼしていたため、これは予想外の結果であった。要因として、差分法の違いと定常・非定常の違いが考えられた。差分法では、有限差分法では、最近接の節点は 4 つである一方で、有限要素法では精度に応じて最近接の節点を増やすことができる。また、有限差分法では、反射・屈折を考慮する行列と主要な作用行列(移流項や散乱積分項)を別にしてしているが、有限要素法では境界条件として、全てまとめて作用していることも異なる。定常系では、光は常に入射されているので、光の弾道的、異方的な寄与は定常系に比べると観察されなくなる。有限要素法に基づいた非定常系のふく射輸送方程式の数値計算を試みたが、媒体内部の反射・屈折を考慮しようとすると計算が収束しなかつたため、検証できなかつた。今後の課題としたい。計算負荷について、有限差分法に比べて有限要素法による計算負荷の方が大きかつた。この理由として、相互作用している節点が有限要素法による計算の方が多いためである。そのため、より計算効率が求められることが示唆された。

二重指数関数法に基づいた 1 次精度の位相関数の重みづけ法について、先行研究で使用されていた 0 次精度の重みづけ法と比較して、より精度と効率の高い結果を得た。また、1 次精度の重みづけ法は異方性因子が 0.7 程度より高い場合に必要となることも明らかにした。方向セット種類による汎用性について、LSE セットや Levedev セットが本研究にて開発した手法と相性が良く、広い範囲で良好な結果を得た。しかし、異方性因子が 1 に近づくと、汎用性は低下する傾向にあった。そのため、より汎用性の高い位相関数の重みづけ法の開発が必要であると認識した。また、位相関数に Henyey-Greenstein 関数や干渉散乱理論の結果を適用したが、位相関数の種類による汎用性や精度の範囲はあまり変化しなかつた。今後の課題として、二重指数関数法以外の重みづけ手法(delta-Eddington 法や Galerkin 求積法)との比較検証が考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Hiroyuki Fujii, Go Chiba, Yukio Yamada, Yoko Hoshi, Kazumichi Kobayashi, Masao Watanabe	4. 巻 SM05
2. 論文標題 Numerical treatment of highly forward scattering on radiative transfer using the delta-M approximation and Galerkin quadrature method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 9th International Symposium on Radiative Transfer, RAD-19	6. 最初と最後の頁 261 ~ 268
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1615/RAD-19.320	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hiroyuki Fujii, Moegi Ueno, Kazumichi Kobayashi, Masao Watanabe	4. 巻 10
2. 論文標題 Characteristic Length and Time Scales of the Highly Forward Scattering of Photons in Random Media	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10010093	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hiroyuki Fujii, Goro Nishimura, Shigeki Endo, Koki Nomura, Kazumichi Kobayashi, Masao Watanabe	4. 巻 AFI-0007
2. 論文標題 Numerical study on light propagation in a white bread loaf	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceeding of the 7th Asian NIR symposium (ANS2020)	6. 最初と最後の頁 14 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shigeki Endo, Hiroyuki Fujii, Kazumichi Kobayashi, Masao Watanabe	4. 巻 NRT-0008
2. 論文標題 Finite element investigation of light propagation in the human neck using the time-dependent radiative transfer theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceeding of the 7th Asian NIR symposium (ANS2020)	6. 最初と最後の頁 60 ~ 61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Koki Nomura, Hiroyuki Fujii, Kazumichi Kobayashi, Masao Watanabe, Goro Nishimura	4. 巻 AFI-0006
2. 論文標題 Analysis of interference effects on light scattering in colloidal suspensions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceeding of the 7th Asian NIR symposium (ANS2020)	6. 最初と最後の頁 12~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kosuke Tabayashi, Hiroyuki Fujii, Shinpei Okawa, Kazumichi Kobayashi, Yukio Yamada, Yoko Hoshi, Masao Watanabe	4. 巻 A5
2. 論文標題 Light propagation models of the human neck for photoacoustic imaging of thyroid cancer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 CMBE Proceedings (6th International Conference on Computational & Mathematical Biomedical Engineering)	6. 最初と最後の頁 161~164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroyuki Fujii, Yukio Yamada, Go Chiba, Yoko Hoshi, Kazumichi Kobayashi, Masao Watanabe	4. 巻 374
2. 論文標題 Accurate and efficient computation of the 3D radiative transfer equation in highly forward-peaked scattering media using a renormalization approach	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 591~604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2018.07.047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroyuki Fujii, Yukio Yamada, Yoko Hoshi, Kazumichi Kobayashi, Masao Watanabe	4. 巻 2116
2. 論文標題 Numerical errors of light propagation in the two-dimensional human neck model using the time-dependent radiative transfer equation with renormalized phase functions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings of ICNAAM 2018	6. 最初と最後の頁 450037、1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5114504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kosuke Tabayashi、Hiroyuki Fujii、Kazumichi Kobayashi、Masao Watanabe	4. 巻 2116
2. 論文標題 Finite element investigation of a void region on light propagation in scattering media using the radiative transfer equation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings of ICNAAM 2018	6. 最初と最後の頁 450052、1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5114519	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroyuki Fujii、Leung Tsang、Jiyue Zhu、Koki Nomura、Kazumichi Kobayashi、Masao Watanabe	4. 巻 28
2. 論文標題 Photon transport model for dense polydisperse colloidal suspensions using the radiative transfer equation combined with the dependent scattering theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 22962 ~ 22962
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/oe.398582	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hiroyuki Fujii、Go Chiba、Yukio Yamada、Yoko Hoshi、Kazumichi Kobayashi、Masao Watanabe	4. 巻 423
2. 論文標題 A comparative study of the delta-Eddington and Galerkin quadrature methods for highly forward scattering of photons in random media	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 109825 ~ 109825
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2020.109825	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 藤井 宏之、山田 幸生、星 詳子、千葉 豪、西村 吾朗、小林 一道、渡部 正夫
2. 発表標題 生体部位における光伝播の解析： 散乱光を用いたイメージングへの応用に向けて
3. 学会等名 第56回日本生化学会北海道支部支部例会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井 宏之
2. 発表標題 近赤外光による果物・食品内部物性値の非破壊評価
3. 学会等名 北海道大学ロバスト農林水産工学国際連携研究教育拠点 食品オープン勉強会「食品センサーと高付加価値化処理」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上野 萌黄、藤井 宏之、小林 一道、渡部 正夫
2. 発表標題 ランダムメディアにおける光学特性値算出のための光伝播モデル
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤 茂樹、藤井 宏之、小林 一道、渡部 正夫
2. 発表標題 輻射輸送論に基づいたヒト頸部内光輸送の数値解析
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村 航希、藤井 宏之、小林 一道、渡部 正夫、西村 吾朗
2. 発表標題 干渉散乱理論に基づいたコロイド溶液における光伝播解析
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kosuke Tabayashi、Hiroyuki Fujii、Shinpei Okawa、Kazumichi Kobayashi、Yukio Yamada、Yoko Hoshi、Masao Watanabe
2. 発表標題 Light propagation models of the human neck for photoacoustic imaging of thyroid cancer
3. 学会等名 6th International Conference on Computational & Mathematical Biomedical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyuki Fujii、Go Chiba、Yukio Yamada、Yoko Hoshi、Kazumichi Kobayashi、Masao Watanabe
2. 発表標題 Numerical treatment of highly forward scattering on radiative transfer using the delta-M approximation and Galerkin quadrature method
3. 学会等名 9th International Symposium on Radiative Transfer, RAD-19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shigeki Endo、Hiroyuki Fujii、Kazumichi Kobayashi、Masao Watanabe
2. 発表標題 Finite element investigation of light propagation in the human neck using the time-dependent radiative transfer theory
3. 学会等名 7th Asian NIR symposium (ANS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koki Nomura、Hiroyuki Fujii、Kazumichi Kobayashi、Masao Watanabe、Goro Nishimura
2. 発表標題 Analysis of interference effects on light scattering in colloidal suspensions
3. 学会等名 7th Asian NIR symposium (ANS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroyuki Fujii, Goro Nishimura, Shigeki Endo, Koki Nomura, Kazumichi Kobayashi, Masao Watanabe
2. 発表標題 Numerical study on light propagation in a white bread loaf
3. 学会等名 7th Asian NIR symposium (ANS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井 宏之、山田 幸生、星 詳子、小林 一道、渡部 正夫
2. 発表標題 光CTによる甲状腺腫瘍診断のための ヒト頸部内光伝播の数値解析
3. 学会等名 第40回日本光医学・光生物学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroyuki Fujii, Yukio Yamada, Yoko Hoshi, Kazumichi Kobayashi, Masao Watanabe
2. 発表標題 Numerical study of light scattering in the human neck for diagnosis of thyroid cancers by optical tomography
3. 学会等名 12th International Conference on Complex Medical Engineering (CME2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤井 宏之
2. 発表標題 生体における光の輸送現象： 輻射輸送方程式の数値計算と光トモグラフィへの応用に向けて
3. 学会等名 2018年度 第50回炉物理夏期セミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroyuki Fujii、Goro Nishimura、Go Chiba、Kazumichi Kobayashi、Masao Watanabe
2. 発表標題 Light propagation model of biological tissues and agricultural products for evaluations of the optical properties
3. 学会等名 The 8th Academic Exchange for Collaborative Research Between ETHZ and Hokkaido University (AECOR8) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Research map https://researchmap.jp/fujii-hr/</p> <p>所属研究室web page https://tfp.eng.hokudai.ac.jp/</p> <p>Google scholar https://scholar.google.com/citations?user=clsrZd8AAAAJ&hl=ja&oi=sra</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	西村 吾朗 (Nishimura Goro)		
研究協力者	渡部 正夫 (Watanabe Masao)		
研究協力者	小林 一道 (Kazumichi Kobayashi)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	星 詳子 (Hoshi Yoko)		
研究協力者	山田 幸生 (Yamada Yukio)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	University of Michigan			