

令和 5 年 5 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02076

研究課題名（和文）高密度なコロイド溶液におけるふく射の干渉効果とふく射輸送に及ぼす影響の解明

研究課題名（英文）Influence of the interference effects on radiative transfer in dense colloidal suspensions

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） 14,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、生体を模擬した高密度なコロイド溶液に対して、ふく射の干渉効果を組み込んだふく射輸送モデル（輸送モデル）を新たに構築した上で、ふく射の干渉効果が及ぼす光伝播への影響を理論、計算、実験より調べた。干渉効果が光散乱特性だけでなく、ふく射輸送の特性時間等にも強く影響を及ぼすことを明らかにした。また、散乱特性と特性時間の体積分率依存性を簡潔に記述するモデル式を開発した。モデル式より散乱特性と特性時間を解析し、単一散乱因子と干渉因子を評価した。これら因子より無次元解析し、一つの曲線上に結果が一致することを示した。これは、干渉効果に波長や粒径分布などに依らない普遍性が存在することを示唆する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近赤外波長帯域の光による生体イメージングや治療において、生体内の光伝播を定量的に予測することが重要である。しかし、近赤外光は生体により強く散乱され、光伝播の予測を困難とする。基礎研究として、生体を模擬した溶液である高密度なコロイド溶液の光散乱特性を調べるのが重要である。高密度なコロイド溶液では、散乱体間の距離が短く、散乱波は干渉し、光散乱特性に強く影響を及ぼす（干渉効果）。本研究では、干渉効果が光散乱特性だけでなく光伝播にも顕著にあらわれることを示した。さらに、干渉効果の普遍的な性質も見出した。本研究の成果は散乱光によるイメージングや治療の開発や社会応用において有用な知見である。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to clarify the interference effect on the light-scattering properties (e.g., scattering coefficient) and radiative transfer characteristics (e.g., mean time of flight) in dense colloidal suspensions by developing the radiative transfer model combined with the dependent scattering theory. We showed the interference of the electric fields scattered by colloidal particles strongly influences the light scattering properties and radiative transfer characteristics. For further analysis, we developed model equations for the properties and characteristics. The developed model equations allow us to evaluate the two factors: the single-particle scattering factor and the interference factor. Dimensionless analysis based on the two factors showed the results are collapsed on a single curve. This result suggests there exists the universality of the interference effect, independently of the optical wavelength, particle size, and so on.

研究分野：光工学、熱工学

キーワード：生体内光伝播、ふく射輸送理論、光学特性値、生体模擬溶液、干渉効果、電磁波散乱理論、近赤外分光法とイメージング

1. 研究開始当初の背景

(1) 光を用いた生体診断や治療の高度化のためには、生体(ヒト筋肉や骨など)における光学特性値(吸収係数、散乱係数など)を正確に算出し、生体内の光伝播を定量的に把握することが重要である。光学特性値は生体の部位や状態(正常や病変)によって異なり、吸収係数と化学組成(ヘモグロビンやミオグロビンなど)との関係、また、光の散乱特性(散乱係数や異方性因子など)と構造特性(分子の平均サイズや配置など)との関係に起因している。生体の光学特性値は、通常、光計測とふく射輸送モデル(以降、輸送モデル)に基づいた逆解析より算出される。この手法では、光計測による光強度の実測値と輸送モデルによる計算値の差が小さくなるように光学特性値を算出するため、生体内の光伝播を適切にモデル化することが高精度な算出に繋がる。輸送モデルでは、光をエネルギー粒子としての「ふく射」として捉え、吸収と散乱を素過程とした光伝播を記述する。診断や治療において使用する光の波長帯域(600-1100 nm)では、吸収よりも散乱過程が主体であるため、散乱過程に関するモデル化が特に重要となる。輸送モデルとして、ふく射輸送方程式(以降、輸送方程式)及び輸送方程式を拡散近似した光拡散方程式がある。

(2) 逆解析による算出値の妥当性を生体に対して検証することは難しく、生体を模擬した溶液(生体模擬溶液)を用いた検証が行われている。生体模擬溶液は光散乱特性を溶液の濃度や散乱体の粒径より調整することができ、固体差が小さく、安定である利点を有する。溶液として、球状散乱体が分散したコロイド溶液(シリカやポリスチレン溶液など)がある。輸送モデルよりも微視的な時空間スケールにて成立する電磁波の散乱理論より光散乱特性の理論値を計算することで、輸送モデルに基づいた逆解析による算出値との比較検証が可能となる。電磁波の散乱理論として、Cartignyらによって提案された干渉散乱理論が広く使用されている(J. Heat Transfer, 1986)。この理論は、多数の散乱体の空間分布によって生じる、ふく射の干渉を記述したものである。体積分率が高い溶液では、各散乱体から散乱された電磁波は独立に観測点に到達せず、散乱波の位相差が重なり合う。ふく射の干渉は約5%以上の体積分率において光散乱特性に強く影響を及ぼすことが報告されている(Y. Yamada, J. Heat Transfer, 1986)。これは、ふく射の干渉効果と呼ばれる。各球形散乱体からの散乱波はMie理論より記述される。位相の重ね合わせについては散乱体群の平均配置を表す静的構造因子より記述され、散乱体間の相互作用に関するモデルによって大きく変化する。Cartignyらは気体モデル(散乱体間の相互作用なし)を用いていた。他方、Nguyenらは剛体球モデル(無限に強い斥力相互作用)を適用し、実験結果との良い一致を示している(Opt. Express, 2013)。

(3) 研究代表者は、散乱体間の様々な相互作用モデルより光散乱特性を数値計算している。その際に、ふく射の干渉は光散乱特性だけではなく、光伝播にも影響を及ぼすと考えられるが、その詳細は明らかではない。輸送方程式において、干渉効果は散乱係数と位相関数へと組み込まれるため、光伝播は散乱係数と位相関数を通じて干渉の影響を受けることになる。また、干渉効果は体積分率、粒径分布、散乱体間の相互作用などによって多種多様に変化することから、体系的に干渉効果を明らかにすることが重要である。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、高濃度なコロイド溶液に対して、ふく射の干渉効果を組み込んだ輸送モデルを新たに構築した上で、干渉効果が及ぼす光伝播への影響を明らかにすることである。本研究では電磁波の散乱理論より干渉を考慮した光散乱特性を計算し、輸送モデルに組み込んだ上で光強度の時間分解波形を数値計算した。また、パルスレーザー光源による光強度の時間応答計測も実施した。ふく射の干渉が光伝播へ影響を及ぼす時空間スケールについて、無次元解析し、理論、数値計算、実験より体系的に明らかにすることを目指した。

(2) 生体光イメージングや光治療において、生体内の光伝播を定量的に把握することが必要であり、光をふく射と捉えた輸送モデルが活用されている。しかし、従来の輸送モデルには、生体のような高密度な散乱媒体において重要となる干渉効果が考慮されていない。本研究を遂行することで、光イメージングや光治療の技術発展に大きく貢献する。

3. 研究の方法

(1) 高濃度なコロイド溶液における光散乱・光伝播モデル

多成分系における干渉散乱理論の開発

ミシガン大学の Leung Tsang 教授(電子工学)との異分野融合的な国際共同研究によって、粒径分布を考慮した多分散系における干渉散乱理論を構築した。殆どの先行研究では、粒径分布を考慮しない単分散系に対する理論が使用されている。多分散系の剛体球モデル(Percus-Yevick モデル)に対する静的構造因子の計算コードを実装した。多分散系と単分散系の計算結果を比較することで、粒径分布が及ぼす干渉効果を数値解析した。ガウス分布のシリカ溶液と対数分布のイントラリピッド水溶液にて検証した。

粒子間の引力を考慮した光散乱特性に関する干渉散乱理論の開発

井戸型の引力ポテンシャルを有した粘性剛体球モデルによる静的構造因子の計算コードを単成分系と多成分(2成分)系において実装した(R.J. Baxter, J. Chem. Phys., 1968; L. Tsang, Scattering of Electromagnetic Waves, 2001)。3つの粘着力強度(強粘着力、中粘着力、完全分散(粘着力なし))の場合における光散乱特性の体積分率依存性を数値解析した。さらに、分子動力学法と干渉散乱理論を組み合わせた計算手法を開発した。粒子間相互作用モデルとして広く使用されるレナード・ジョーンズモデルに対して分子動力学法より静的構造因子を数値計算し、干渉散乱理論に組み込んだ。レナード・ジョーンズモデルで必要とするエネルギーと粒径に関するパラメータは、流体相におけるパラメータ値を用いた。分子動力学シミュレーションはロスキレ大学が開発している GPU 計算パッケージである RUMD を用いた。シミュレーションでは拡散領域に遷移した後の液体状態を初期配置として、無次元時間 10 の 6 乗まで計算し、静的構造因子を時間平均より取得した。

干渉効果を考慮した輸送モデルの開発

干渉散乱理論より計算した光散乱特性の結果を輸送モデルに組み込み、干渉効果を考慮した光伝播の計算手法を開発した。輸送方程式においては散乱係数と位相関数、光拡散方程式においては換算散乱係数を組み込んだ。輸送方程式で必要とする位相関数について、干渉散乱理論の結果を Legendre 展開することで計算精度を向上させた。輸送方程式の数値計算について、粒径が波長に近い場合には、前方散乱性が強い。この場合において、計算精度と計算効率を両立させた計算手法として、Galerkin 求積法(J.E. Morel, Nucl. Sci. Eng., 1989)と delta-Eddington 法(J.H. Joseph, J. Atmos. Sci., 1976)、両手法を組み合わせた方法(新規に開発)の三者を比較、検証した。輸送方程式の計算手法として、空間離散に対しては 3 次精度 WENO 法で固定し、方向離散に対しては LSE 法(方向数: 48, 80, 120, 168, 224, 288, 360)と E0 法(方向数: 48, 80, 120, 168, 224, 288)の計 13 種類で検証した。方向離散については位相関数のモーメント値を参照値として、光強度の時間応答の計算結果については解析解を参照値として、それぞれ計算精度を検証した。

(2) 反射光強度の時間分解計測

単一光子時間分解計測システムの構築

波長 785nm の固体レーザー(Calmar Laser)を用いた光強度の時間応答計測システムを新規に構築し、コロイド溶液(豆乳と凝集剤)に対して光計測を実施した。光源と検出点間距離を 1.5cm とし、外部からの光の影響を抑えるため、システムを暗箱で覆った。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強度の時間応答を SPAD(PDM SPD-050-CTE-FC, Micro photon devices)より計測した。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 プリンター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。500ml のビーカーに 400ml の試料を用いて、マグネットスターラーより攪拌させた。純水で豆乳試料を希釈し、濃度を 5%、8%、11% に変化させた。温度は常温で一定とした。実験は各濃度に対して 5 回行った。計測データを非定常の輸送モデルより逆解析し、換算散乱係数を算出した。輸送モデルとして、半無限媒体における光拡散方程式を適用した。液面以外の境界によるサイズ効果が小さくなるように、大きな容器とした。

波長可変レーザー(700-850nm)による反射光強度の時間分解計測

共同研究者の西村吾朗助教(北海道大学、電子科学研究所)が構築している単一光子時間分解計測システムを使用し、溶液の反射光強度の時間分解計測の波長依存性を計測した。波長可変レーザー(Maitai XF-1RF-KE and 3980-MPS-KE, Spectra-Physics)を用い、繰り返し周波数を AOM(Acoustic optical modulator)より 8 MHz に間引いた。その他の計測条件はと同様とした。静注脂肪乳剤であるイントラリピッド溶液を試料とした。純水で希釈し、体積分率 1% から 22% まで、およそ 1% 間隔、それぞれ 3L の試料を作製した。直方体容器に試料をいれ、攪拌した後、光計測を行った。実験は各条件(濃度や波長)に対して 3 回行った。と同様に逆解析より換算散乱係数を算出した。

(3) 光散乱・光伝播における無次元解析

光散乱・光伝播におけるモデル式の開発

光散乱特性や光伝播の特性時間に対する体積分率依存性を解析するため、モデル式を開発した。モデル式は体積分率依存性を陽に表しており、単一粒子による散乱と干渉の寄与を表す2つの因子を有している。静的構造因子などの積分値を初等関数で近似した。干渉散乱理論による数値計算結果や実験結果をモデル式で解析し、干渉因子の波長依存性などを調べた。

4. 研究成果

(1) 高濃度なコロイド溶液における光散乱・光伝播モデル

干渉散乱理論によって計算した光散乱特性を解析した。シリカ溶液の場合には、粒径分布が鋭いガウス分布であり、単成分系と多成分系の数値計算結果の違いは小さかった。他方、粒径分布が広い対数分布を有している脂質エマルジョン(イントラリピッド水溶液)では、単成分系と多成分系の結果が大きく異なった。また、多成分系の脂質エマルジョンの実験結果(Zaccanti, Appl. Opt., 2003)と干渉散乱理論の結果を比較し、定量的に一致していることを確認した。これらの結果より、粒径分布が広がっている溶液に対して、多成分系の干渉散乱理論が有効であり、粒径分布による干渉効果は大きいことが明らかとなった。

粘着性剛体球モデルによる干渉散乱理論の計算結果では、粘着力が強くなると、散乱係数や換算散乱係数の値は増加した。この結果は体積分率が高い領域で顕著であった。また異方性因子は1に近づき、前方散乱性が強くなった。このことは、静的構造因子の角度依存性からも示さ、散乱角が小さい、前方散乱領域で、静的構造因子の値は増加していた。レナード・ジョーンズモデルによる干渉散乱理論の計算結果も同様であり、引力相互作用により、散乱係数が増加した。粘着性剛体球モデルとは異なり、分子動力学シミュレーションでは、各時刻における粒子群の位置情報を取得できるため、クラスター解析を行った。引力相互作用により、粒子同士がクラスターを形成していることを確認した。この結果は、粒子径が見かけ上大くなり、光散乱特性が増加したと考えられた。粘着性剛体球モデルや剛体球モデルによる解析解では、無限媒体(バルク)を考えている。他方、シミュレーションのシステムサイズは有限であるため、有限サイズ効果を検証した。システム長の逆数に対応する波数(角度)にピークが生じるものの、散乱特性への影響は小さいことを確認した(計算相違5%未満)。

非定常系の輸送モデルより光強度の時間応答、定常系の輸送モデルより光強度の空間分布を計算した。干渉効果を考慮した輸送モデルと考慮していない従来モデルの結果を比較し、干渉効果がふく射の輸送スケールにまで影響を及ぼしていることが明らかとなった。ふく射の輸送スケールは弾道領域と拡散領域に大別される。短い時空間スケールである弾道領域の方が、長い時空間スケールである拡散領域に比べて干渉効果が顕著にあらわれた。この要因として、弾道領域では拡散領域に比べて散乱の回数が少なく、干渉の情報を保持していると考えられた。時間応答の波形は単一のピークを有しており、そのピーク時間が特性時間となる。ピーク時間の体積分率依存性を解析した。ピーク時間は干渉を考慮していない場合においても曲線的であり、散乱特性の体積分率依存性よりも複雑な挙動を示した。また、輸送方程式と光拡散方程式の結果を比較し、体積分率が2%以上において、拡散近似が成立していることを確認した。前方散乱性の強い輸送方程式の数値計算として、Galerkin 求積法、delta-Eddington 法、両手法の組み合わせについて、位相関数のモーメントの数値積分値を評価した。Galerkin 求積法が delta-Eddington 法よりも計算精度が高く、様々な離散方位セットに対して汎用性の高い手法であった。両手法の組み合わせ法は、Galerkin 求積法と同等の結果であった。今回は異方性因子の値を固定したが、今後は異方性因子の値を変化させて、3つの手法の汎用性を検証することが課題である。

(2) 反射光強度の時間分解計測

光量や時間軸の調整に時間を要したが、新規に光計測システムを構築することができた。新規のシステムより、濃度が異なる3つの試料(豆乳、5%、8%、11%)の時間分解計測を実施することができた。濃度が高くなるに従って、換算散乱係数は増加した。また、その挙動は曲線的であり、干渉効果があらわれていることを確認した。また、凝集剤を添加させると、換算散乱係数は添加前に比べて有意に増加し、その増加は濃度が高い方が顕著であった。この結果は引力を考慮した数値計算結果と定性的に一致している。換算散乱係数の値は、同じ濃度であっても異なる豆乳製品では異なっていた。これは、豆乳の固形成分(脂質やタンパク質など)の違いによって生じていると考えられた。今後は、より細かく濃度を変化させて、換算散乱係数の結果を解析していくことが課題である。また、凝集剤を添加した場合、試料が不均一となることが課題であり、試料を小さくして、均一性を保つなど対策していくことを考えている。

波長範囲 760 nm - 850 nm における脂質エマルジョンの換算散乱係数の体積分率依存性を体系的に算出した。波長が長くなるに従い、換算散乱係数の値は低下した。

これは、波長が長いことは粒径が小さくなることに対応するため、散乱確率が低下するためだと考えた。この波長依存性は数値計算結果と定性的に一致した。また、体積分率依存性は曲線的であり、干渉効果を実験的に確認した。光計測はふく射輸送のスケールより実施していることから、干渉効果がふく射輸送に影響を及ぼしていることが実験的にも示された。計測課題として、試料のサイズ削減がある。今回は半無限媒体の輸送モデルを用いた逆解析を行っているため、試料サイズを大きく、3Lとしていた。大きいサイズの試料作製はコストが高い。一方で、試料サイズを小さくすると半無限媒体のモデルの適用が難しい。容器形状を考慮し、かつ計算効率の高い輸送モデルの開発が今後の課題である。

(3) 光散乱・光伝播における無次元解析

波長範囲(600 nm-980 nm)における干渉散乱理論による光散乱特性や干渉効果を考慮した輸送モデルによる特性時間(時間分解波形のピーク時間)の数値計算結果をモデル式より解析した。光散乱特性と特性時間ともに、モデル式より良くフィッティングすることができた。ピーク時間のモデル式の開発の際に、ピーク時間と光源と検出点間距離の関数が必要であった。ピーク時間と距離を光学特性値で規格化し、無次元解析することでその関係式を求めた。モデル式に含まれる単一粒子による散乱因子は理論値とフィッティング結果は良く一致した。干渉による因子のフィッティング結果の波長依存性は波長が長くなるに従い、減少した。また、イントラリポス溶液に対する光計測に対してもモデル式で解析し、同様な干渉因子の結果を得た。このメカニズムは排除体積などで説明できると考えられたが、今後の課題とした。また、モデル式より評価した2つの因子で光散乱特性や特性時間を無次元化した。波長によって、異なっていた光散乱特性や特性時間の結果がそれぞれ一つの曲線で一致した。これは、波長に依らない干渉効果の普遍性が存在することを示唆する。粒径分布を変化させた場合の結果も同様であった。干渉散乱理論の計算には、粒径分布などの事前情報を必要とし、計算負荷は高い。他方、開発したモデル式は、初等関数で表現されているため、計算負荷は小さく、2つのフィッティングパラメータにより、事前情報を必要としない利点がある。今後、様々な実験結果や数値計算結果をモデル式より解析し、干渉効果の普遍性をさらに明らかにすることが研究課題である。

<参考文献>

- [1] J. D. Cartigny, et al., J. Heat Transfer, Vol.108, PP.608-613 (1986)
- [2] Y. Yamada, et al., J. Heat Transfer, Vol.108, PP.614-618 (1986)
- [3] Nguyen et al., Opt. Express, Vol.21, PP.29145-29156 (2013)
- [4] R.J. Baxter, J. Chem. Phys., Vol.49, PP.2770-2774 (1968)
- [5] L. Tsang et al., Scattering of Electromagnetic Waves: Numerical Simulations, John Wiley & Sons, 2001
- [6] J.E. Morel, Nucl. Sci. Eng. Vol.101, PP.72-87 (1989)
- [7] J.H. Joseph, et al., J. Atmos. Sci. Vol.33, PP.2452-2459 (1976)
- [8] G. Zaccanti et al., Appl. Opt. Vol.42, PP.4023-4030 (2003)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Fujii Hiroyuki, Terabayashi Iori, Kobayashi Kazumichi, Watanabe Masao	4. 巻 27
2. 論文標題 Modeling photoacoustic pressure generation in colloidal suspensions at different volume fractions based on a multi-scale approach	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Photoacoustics	6. 最初と最後の頁 100368 ~ 100368
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pacs.2022.100368	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 Fujii Hiroyuki, Ueno Moegi, Inoue Yuki, Aoki Toshiaki, Kobayashi Kazumichi, Watanabe Masao	4. 巻 30
2. 論文標題 Model equations of light scattering properties and a characteristic time of light propagation for polydisperse colloidal suspensions at different volume fractions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 3538 ~ 3538
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/oe.447334	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 Fujii Hiroyuki, Terabayashi Iori, Aoki Toshiaki, Inoue Yuki, Na Hyeonwoo, Kobayashi Kazumichi, Watanabe Masao	4. 巻 12
2. 論文標題 Numerical Study of Near-Infrared Light Propagation in Aqueous Alumina Suspensions Using the Steady-State Radiative Transfer Equation and Dependent Scattering Theory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1190 ~ 1190
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app12031190	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 Fujii Hiroyuki, Aoki Toshiaki, Inoue Yuki, Terabayashi Iori, Kobayashi Kazumichi, Watanabe Masao	4. 巻 PO-11
2. 論文標題 Numerical Modelling of Initial Photoacoustic Pressure in Colloidal Suspensions for Photoacoustic Imaging	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Technical digest of 26th Microoptics Conference (MOC2021)	6. 最初と最後の頁 164 ~ 165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/MOC52031.2021.9598078	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 Aoki Toshiaki、Fujii Hiroyuki、Inoue Yuki、Kobayashi Kazumichi、Watanabe Masao	4. 巻 011
2. 論文標題 Derivation of an extended radiative transfer equation from the electromagnetic wave equation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Extended abstract of NIR2021	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 Inoue Yuki、Fujii Hiroyuki、Nishimura Goro、Aoki Toshiaki、Kobayashi Kazumichi、Watanabe Masao	4. 巻 P13
2. 論文標題 Study on near-infrared light scattering in colloidal suspensions using time-resolved measurements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Extended abstract of NIR2021	6. 最初と最後の頁 168-169
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 Fujii Hiroyuki、Tsang Leung、Zhu Jiyue、Nomura Koki、Kobayashi Kazumichi、Watanabe Masao	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 Fujii Hiroyuki、Chiba Go、Yamada Yukio、Hoshi Yoko、Kobayashi Kazumichi、Watanabe Masao	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20件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Hiroyuki Fujii、Hyeonwoo Na、Toshiaki Aoki、Yuki Inoue、Iori Terabayashi、Kazumichi Kobayashi、Masao Watanabe
2. 発表標題 Near-infrared scattering properties for binary sticky hardsphere fluids
3. 学会等名 OPIC OPTICS & PHOTONICS International Congress 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤井宏之、小林一道、渡部正夫、西村吾朗
2. 発表標題 高濃度溶液における光散乱を伴い発生する光音響波モデリング
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤井宏之、井上優輝、羅炫禹、小林一道、渡部正夫
2. 発表標題 高濃度溶液における近赤外レーザーで誘起する光音響波モデリング
3. 学会等名 第38回近赤外フォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Inoue Yuki、Fujii Hiroyuki、Nishimura Goro、Aoki Toshiaki、Kobayashi Kazumichi、Watanabe Masao
2. 発表標題 Wavelength dependent interference effects on the light scattering in fat emulsions using time dependent diffuse reflectance measurements
3. 学会等名 The 8th Asian NIR Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤井宏之、羅炫禹、青木俊晃、井上優輝、寺林伊織、小林一道、渡部正夫
2. 発表標題 コロイド粒子の粘着性が及ぼす近赤外光散乱特性への影響に関する数値解析
3. 学会等名 第59回 伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上優輝、藤井宏之、西村吾朗、小林一道、渡部正夫
2. 発表標題 時間分解計測を用いた脂肪乳剤における光散乱の干渉効果の波長依存性に関する調査
3. 学会等名 第38回近赤外フォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上優輝、藤井宏之、西村吾朗、小林一道、渡部正夫
2. 発表標題 時間分解計測によるコロイド溶液の換算散乱係数の波長依存性とその干渉効果の解析(2)
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西川小彌太、藤井宏之、西村吾朗、小林一道、渡部正夫
2. 発表標題 豆乳凝集過程モニタリングのための光散乱特性計測
3. 学会等名 日本機械学会北海道支部 第52回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroyuki Fujii, Toshiaki Aoki, Yuki Inoue, Iori Terabayashi, Kazumichi Kobayashi, Masao Watanabe
2. 発表標題 Numerical modelling of initial photoacoustic pressure in colloidal suspensions for photoacoustic imaging
3. 学会等名 26th Microoptics Conference (MOC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshiaki Aoki, Hiroyuki Fujii, Yuki Inoue, Kazumichi Kobayashi, Masao Watanabe
2. 発表標題 Derivation of an extended radiative transfer equation from the electromagnetic wave equation
3. 学会等名 NIR2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Inoue, Hiroyuki Fujii, Goro Nishimura, Toshiaki Aoki, Kazumichi Kobayashi, Masao Watanabe
2. 発表標題 Study on near-infrared light scattering in colloidal suspensions using time-resolved measurements (Best poster award)
3. 学会等名 NIR2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井宏之, 上野萌黄, 青木俊晃, 井上優輝, 小林一道, 渡部正夫
2. 発表標題 コロイド溶液中の光干渉効果が及ぼすふく射輸送への影響に関する数値解析
3. 学会等名 第58回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上優輝, 藤井宏之, 西村吾朗, 青木俊晃, 小林一道, 渡部正夫
2. 発表標題 時間分解計測によるコロイド溶液の換算散乱係数の波長依存性とその干渉効果の解析
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺林伊織, 藤井宏之, 小林一道, 渡部正夫
2. 発表標題 近赤外レーザーで誘起される光音響波のマルチフィジックスモデル(Student Travel Award)
3. 学会等名 第37回近赤外フォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 羅炫禹, 藤井宏之, 寺林伊織, 小林一道, 渡部正夫
2. 発表標題 分子動力学法によるLJ 流体の光散乱解析
3. 学会等名 日本機械学会北海道学生会 第51回 学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井宏之
2. 発表標題 生体・農産物・食品における光散乱のモデリングと解析(NIR Advance Award受賞講演)
3. 学会等名 第36回近赤外フォーラム(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井宏之, 野村航希, 小林一道, 渡部正夫
2. 発表標題 多分散コロイド溶液における散乱波の干渉効果に関する数値解析
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2020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 輻射輸送における干渉効果に関する数値解析
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木俊晃, 藤井宏之, 小林一道, 渡部正夫
2. 発表標題 電磁波の波動方程式から輻射輸送方程式の理論的導出
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上優輝, 藤井宏之, 西村吾朗, 小林一道, 渡部正夫
2. 発表標題 時間分解計測を用いた近赤外波長帯域におけるコロイド溶液の光散乱に関する調査
3. 学会等名 日本機械学会北海道学生会 第50回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 藤井 宏之	4. 発行年 2021年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 628
3. 書名 生体ひかりイメージング 基礎と応用、1章3節、2章5節	

〔産業財産権〕

〔その他〕

Research map https://researchmap.jp/fujii-hr/ 所属研究室web page https://tfp.eng.hokudai.ac.jp/ Google scholar https://scholar.google.com/citations?user=clsrZd8AAAAAJ&hl=ja&oi=sra 個人web page https://fujii-hr.eng.hokudai.ac.jp/

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
研究分担者	西村 吾朗 (Nishimura Goro) (30218193)	北海道大学・電子科学研究所・助教 (10101)	
研究分担者	渡部 正夫 (Watanabe Masao) (30274484)	北海道大学・工学研究院・教授 (10101)	
研究分担者	小林 一道 (Kobayashi Kazumichi) (80453140)	北海道大学・工学研究院・准教授 (10101)	

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	山田 幸生 (Yamada Yukio)		
研究協力者	星 詳子 (Hoshi Yoko)		
研究協力者	ジャン ルイ (Jiang Rui)		

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	ミシガン大学			