

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05302

研究課題名（和文）ナノ流体ネットワーク構造の光操作と光ニューロン回路に関する研究

研究課題名（英文）Optical manipulation of nanofluid network and optical neuron circuit

研究代表者

大平 泰生（OHDAIRA, Yasuo）

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：10361891

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、アゾベンゼンポリマー微粒子の光変形性を用いて、ナノ領域の流体ネットワーク構造を光操作する手法を開発し、これを光ニューロン回路に応用することを目的としている。ここでは光操作できる流体ネットワーク構造における物質移動と光信号輸送に基づく光ニューロン回路の基盤技術を開発した。液中でのアゾ微粒子の特異な光変形性を見出し、アゾ粒子をアンカーとして用いた液体の自己組織化の光操作性について検証した。さらにマイクロ液晶界面での物質流の光制御、マイクロ流体の光伝搬特性、および光近接場の局所偏光によるアゾナノ粒子の形状操作を調べ、ナノ流体ネットワーク構造による近接場光信号輸送の基盤技術を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の目指す光ニューロン回路機構の開発を通じて、液中におけるアゾベンゼン微粒子の特異な光変形について見出すとともに、光変形するアゾ微粒子をアンカーとして用いたマイクロ流体の光操作、およびマイクロ流体流路における界面物質移動や光伝搬などの独創的な研究を推進し、高い学術的意義をもつ成果を得た。さらに、光近接場の局所偏光によるアゾ微粒子の光変形、ナノ流体ネットワーク形成への展開、および近接場信号輸送を検討し、光ニューロン回路の基盤を整えた。これらは、ソフトマターによる光信号制御や光信号処理に基づく新たな知能デバイス開発に繋がるものであり、社会的に有用な応用展開が期待される。

研究成果の概要（英文）：Optical manipulation of nanofluid networks utilizing azobenzene polymer particles and its application to optical neuron circuit were investigated. The basic techniques were developed for optical neuron circuit based on material transportation and optical signal transfer in fluid network structures. In this study, azobenzene particles were employed as an anchor to control fluid distribution. We found anomalous optical deformation of azo particles in a liquid, and investigated self-organization control of liquid by azo particles. Material transportation at an interface of micro liquid crystal, optical propagation in a microfluid, and nano manipulation of the shape of azo nano particles were investigated. Near field optical signal transfer utilizing nanofluid network structures was considered.

研究分野：近接場光学

キーワード：ナノ流体 アゾ微粒子 自己組織化 光操作 光ニューロン回路

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

光による変形性をもつソフトマターは、光駆動するマイクロロボットのアクチュエーション機構や化学分析への応用が期待されている。さらに生体模倣技術を複合することでソフトマターによる知能デバイスの開拓が期待できる。本研究は、知能開拓の鍵として、物質移動の自由度をもたせたソフトマターで形成するニューロン構造に注目する。特に、究極のソフトマターである流体を用いることで、生体シナプス系に類似するニューロン機能をもたらすものと期待できる。アゾベンゼンポリマー微粒子は、光異性化反応により微粒子の形状を光操作できる。アゾ微粒子を用いて液体分布を光操作することで流体流路ネットワークを形成できれば、流体流路ネットワーク構造中の伝搬光を光信号とし、さらに流路の光変形性および流路の物質流により発現する、光のスイッチングや強度変調性に基づく、光ニューロン回路の実現と光知能デバイスへの応用展開が期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究は、アゾベンゼンポリマー微粒子を用いた液体分布の自己組織化の光操作と流体ネットワーク構造制御法を開発し、これを物質移動型の光ニューロン回路の形成技術と光信号制御に活用展開することを目的としている。

### 3. 研究の方法

流体ネットワークの形状と光学応答を光操作の要素技術を開発し、物質移動型のニューロン構造制御と光ニューロン回路への応用展開するための基盤研究を推進した。具体的には、まず、液体分布を光操作するアンカーとしてのアゾ微粒子の光変形の基礎特性を調べ、液中におけるアゾ微粒子の特異な光変形を明らかにした。さらに、アゾ微粒子の光異性化による光変形で誘起する、液体分布の自己組織化の制御性を利用した、マイクロ液体流路の光操作について検証した。また、マイクロ液晶界面における蛍光物質の光移動、およびマイクロ流体における光伝搬特性について調べた。さらに、ナノアゾ微粒子と近接場光の局所偏光との相互作用による光変形、およびナノ流体との近接場光相互作用の効果について調べた。また表面プラズモンによるアゾベンゼンのマイクロライン描画についても検証した。

### 4. 研究成果

主に下記6点の成果を得た。

#### (1) 液体中におけるアゾベンゼンポリマー微粒子の特異な変形特性の解明

アゾ微粒子を用いた流体流路の光操作において重要となる、液体中におけるアゾ微粒子の光変形の基本特性について調べた。これまでに我々は、アゾ微粒子の入射光の偏光方向への延伸とその可逆性を確認してきた。本研究ではさらに液中での光変形特性を調べた。ガラスセルを液体で充填し PMMA-co-DR1 分子から生成したアゾ微粒子を分散させ、光励起により生じる形状変化を倒立型光学顕微鏡により観測した。ここでは、粘性の異なる純水およびグリセリンを用いて、空気中における光変形と比較した。その結果、液中のアゾ微粒子は、空気中と比べ、極めて大きく変形することを見出した。特に、最も単純な純水では、空気中に比べて数倍から数10倍程度も形状が大きく変化し、ワイヤー状に変形した。純水中におけるアゾ微粒子のブラウン運動や、エッジ部分の電場の光異性化によるものと予測される特殊な形状が生じることも確認された。さらに、より粘性が高いグリセリンにおいては、アゾ粒子はより直線状に光変形し、グリセリン濃度と形状の変化速度との相関性も明らかになった。これらのことから、液中におけるアゾ微粒子の光変形において、液体を介したアゾベンゼン分子の光異性化反応の促進や熱力学的効果が生じていることを理論に考察した。

#### (2) マイクロ液晶/水界面における蛍光分子の光場による物質移動の評価

ニューロン機能の要となるマイクロ流体流路界面における物質の光移動について調べた。特に本研究では流体ネットワーク構造に多様な光学特性の制御性を付加する流体として液晶媒質に注目した。また、これまで明らかにしてきた巨視的な領域における液晶/水界面での蛍光物質の光移動をさらに微細な領域のマイクロ流体流路に展開するために、マイクロ流体流路に形成した液体界面における物質移動の光操作について調べた。ここでは、その基本特性を明らかにするために、マイクロサイズの円筒ガラス内に液晶と純水を注入することで形成した、マイクロ液晶/水界面におけるローダミン 6G 分子(Rh6G)の光による物質移動を観測した。入射レーザー光の伝搬方向に沿った、Rh6G 分子の移動を確認した。マイクロな液体界面においても分子の移動方向と光の入射方向に相関性があり、分子の移動量および移動距離がマイクロ円筒ガラスの内径に依存することが明らかになった。これらから円筒内のマイクロ液体界面における物質移動のメカニズムおよび移動特性について、光の力学的効果、光エネルギーによる熱力学的効果、流体の表面張力などの物性の効果などから考察した。また、これまでに明らかにしてきた表面プラズモ

ン励起による液晶ドロップレットの相状態変化について、電磁界計算を援用した理論的検討を行い、その素過程について考察するとともに、ナノ界面の近接場光による物質移動の局所誘起の可能性について理論的に検討した。その予備実験として、液晶と純水のドロップレット界面における、集光レーザー光を用いたピンポイント励起による、蛍光分子の部分的な物質移動について実験的に検証した。

(3) アゾベンゼンポリマー微粒子を用いたマイクロ流体流路の光操作法の開発、マイクロ流体流路における光伝搬特性の評価

光ニューロン回路のネットワーク網の形成と形状制御の基盤となる、アゾ微粒子を用いたマイクロ流体流路の光形成について検証した。マイクロ領域の流体の分布を決める流体のアンカーとしてアゾベンゼンポリマー微粒子を用い、流体の自己組織化に光の操作性を付加することで、液滴からマイクロ流体の流路を光場で形成させる手法について検証した。ここでは、倒立型光学顕微鏡に光加工用レーザーと微粒子形状を動画撮像するための CCD カメラを付加したアゾ微粒子光加工システム、および光学顕微鏡の動画の画像解析プログラムを開発することで、光変形過程におけるアゾ微粒子のサイズと形状のリアルタイム評価システムを構築した。特に入射偏光に対するアゾ微粒子の変形率の時間依存性を詳細に調べることで、アゾ微粒子の変形ダイナミクスについて考察した。本研究ではさらに、マイクロサイズのアゾ微粒子の近傍に配置したグリセリンのマイクロ液滴の空間分布の光操作について検証した。熱処理により先鋭化したマイクロポリマーピペットを用いて、所望の位置にグリセリンマイクロ液滴を高精度に配置する手法を開発した。単一のアゾ微粒子の両側に配置した2つの液滴対の操作について調べた。伝搬光の励起により光変形したアゾ微粒子により、マイクロ液滴対の空間分布が変化し、液滴対がアゾ微粒子の変形方向に沿って結合することが確認された。これらの変形過程には本研究で明らかにしたアゾ微粒子の液中における特異な光変形が、液体分布の変形の促進に大きく寄与するとともに、得られる液体分布の多様性をもたらすことが明らかになった。また複数の液滴やアゾ粒子を用いて、液体を多方向に変形や分岐させる手法、およびこれを応用したネットワーク構造の自己組織化過程について理論的に考案し、基礎データを収集した。本研究ではさらに、アゾ微粒子の光変形で形成したグリセリンマイクロ流体流路における光伝搬特性について調べた。マイクロ流体流路を形成した液滴を光の入出力部として利用して、マイクロ流体流路への光導波および導波光を検出する手法を開発した。ここでは、グリセリンの液滴対およびマイクロ流体流路における散乱光を光学顕微鏡により観測し、散乱光分布からマイクロ流体流路における光導波について考察した。

(4) 液晶ドロップレットおよびマイクロ液晶柱の光マニピュレーション法の開発

流体ネットワークの構造書換えのための液晶ドロップレットおよびマイクロ液晶柱の光マニピュレーション法を開発した。これまで開発してきたアゾベンゼン薄膜による液晶ドロップレットからの液晶流路形成技術をマイクロ液晶流路の光形成に応用展開する手法、さらに光ピンセットを用いたマイクロ流路の光マニピュレーションについて調べた。ここでは、レーザー走査光学系を組み込んだ、液体ドロップレットの光マニピュレーションシステムを構築した。光ピンセットによる液晶液滴の光操作で液晶マイクロ液流路を形成しその形状制御する手法、および、マイクロ流体流路の多次元化に有用となる、マイクロ液晶セル界面に架橋した液晶柱の光マニピュレーションについて調べた。さらに、光トラップで操作した液晶液滴とグリセリン液滴における異種液体界面をもつ複合マイクロネットワーク液滴界面の形成を明らかにした。グリセリン液滴対を液晶で結合させたマイクロ流路構造を形成することに成功し、液晶の部分的な光捕捉により流路構造を変調できることを明らかにした。これらは流体ネットワークの構造とネットワーク間の結合状態の全光学的な制御に有用なものになるものと考えられる。

(5) 光近接場の局所偏光によるナノアゾ微粒子の光変形の評価

光近接場の局所偏光によるナノメートルサイズのアゾ微粒子の形状の光操作について調べた。アゾベンゼン分子の溶媒の最適化により、ナノサイズのアゾ微粒子を生成した。伝搬光の直線偏光による光変形についてマイクロ粒子の変形特性と比較した。さらに、平坦基板表面の合成エバネッセント波で発生させた近接場光の局所偏光とナノアゾ微粒子を相互作用させ、ナノアゾ微粒子の形状変化を原子間力顕微鏡で評価した。単一のナノアゾ微粒子はロッド状に形状変形し、ロッドの長軸が局所的な直線偏光に沿って配向する傾向があることを確認した。また複数のアゾ微粒子が存在する複合状態では、単一の場合とは異なった形状変化となることから、アゾ微粒子間の近接場光相互作用による特殊な変形形状が生じることが考えられた。さらに、純水に分散させたナノアゾ微粒子と光近接場の局所偏光との相互作用についても調べた。ナノアゾ微粒子とナノ液体間が混在する複合系では、さらに多様な形状が生じることが確認された。これらもナノ液体とナノアゾ微粒子との近接場光相互作用によりもたらされることが予測された。本研究ではまた、光近接場の局所偏光によるアゾベンゼン超薄膜からのナノサイズの異方性アゾ微粒子の生成についてはじめて見出した。生成される異方性ナノアゾ粒子の方位と光近接場の局所偏光との相関性が確認された。アゾ分子の光異性化反応によるアゾ超薄膜のソフト化、光近接場による力学的効果による偏光選択的な形状形成について理論的に考察した。ナノアゾ微粒子とナノ流体の複合系でもこれらと同様な現象が生じるものと考えられ、アゾ微粒子の光変形にお

いてナノ液体を援用することで、近接場光相互作用を介した微粒子系の自己変形やナノ流体ネットワーク構造の自己形成、さらにはこれらのナノ構造の自己最適化に応用できるものと考えられる。本研究では、さらにこれらの知見をもとに、光ニューロン回路を構成するナノ流体ネットワーク構造における近接場光相互作用を介した近接場光信号輸送について検討した。

(6) 表面プラズモンによるアゾベンゼン・マイクロライン形成とマイクロ構造描画法の開発  
金属薄膜上の表面プラズモンとアゾ微粒子との相互作用におけるマイクロ構造形成について調べた。特に、マイクロメートルオーダーの極めて長距離にわたるアゾベンゼン分子のラインを形成することができることが明らかになった。ここではその形成過程について明らかにするために、ガラス基板の全反射で発生するエバネッセント波を用いて、アゾ微粒子の光変形に伴うライン形成とその偏光依存性について調べた。エバネッセント波の波数ベクトルと偏光の組み合わせにより、場の伝播方向に平行あるいは垂直なラインが形成されることが確認された。またライン形成の可逆性を確認し、多段階の光場の照射により複合のライン構造を描画できることを見出した。このようなアゾベンゼン分子により形成されたマイクロラインは、光異性化反応による構造書換や局所的または大局的な屈折率の光制御に応用できると考えられ、アゾ分子マイクロラインを光導波路として用いた光信号のスイッチングや変調の有用な手法になるものと期待できる。また表面プラズモンの共鳴状態を利用した表面構造と光場の選択的なナノ領域の光信号輸送への応用も考えられ、光ニューロン回路における情報記録などへの応用が期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 浅川 成己, 新保 一成, 岡 寿樹, 大平 泰生
2. 発表標題 ガラスセル内に架橋したマイクロ液晶柱の光走査
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中井 優太, 新保 一成, 岡 寿樹, 大平 泰生
2. 発表標題 ナノサイズ化したアゾベンゼンポリマー微粒子の形状の光操作
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平島 駿一, 新保 一成, 岡 寿樹, 大平 泰生
2. 発表標題 アゾ微粒子の光異性化反応によるマイクログリセリン液滴対の光変形
3. 学会等名 令和3年度(2021年) 応用物理学会 北陸・信越支部 学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田 吉亨, 新保 一成, 岡 寿樹, 大平 泰生
2. 発表標題 アゾベンゼンポリマー微粒子の光変形の偏光依存性
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 北島 雅之, 新保 一成, 岡 寿樹, 大平 泰生
2. 発表標題 円筒ガラス細管内の液晶・水界面におけるローダミン分子の光物質移動
3. 学会等名 令和 2 年 電気学会 基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂井 祐太, 新保 一成, 岡 寿樹, 大平 泰生
2. 発表標題 アゾベンゼン分子を分散させた液晶ドロップレットの光トラッピング
3. 学会等名 令和 2 年 電気学会 基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤 光, 岡 寿樹, 新保 一成, 大平 泰生
2. 発表標題 水に分散したアゾ微粒子の近接場局所偏光による光変形
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasuo Ohdaira, Akira Baba, Kazunari Shinbo, Keizo Kato
2. 発表標題 Self-Assembly of Fluorescent Nanospheres on Nanostructured Azo Molecular Thin Films
3. 学会等名 The 7th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林 謙裕, 岡 寿樹, 新保 一成, 大平 泰生
2. 発表標題 水媒質中におけるアゾポリマー微粒子の光変形特性
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中澤 知也, 新保 一成, 岡 寿樹, 大平 泰生
2. 発表標題 液晶・水滴レット内に形成した界面における蛍光分子の光移動
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森脇 舜, 新保 一成, 岡 寿樹, 大平 泰生
2. 発表標題 金薄膜上で光励起した液晶ドロップレットの相変化
3. 学会等名 令和元年度(2019年)応用物理学会北陸・信越支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大平 泰生
2. 発表標題 微小液晶ドロップレットにおける物質移動と位置の光操作
3. 学会等名 日本光学会ナノオプティクス研究グループ 第26回研究討論会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	岡 寿樹  (OKA Hisaki)  (00508806)	北里大学・理学部・教授   (32607)	
研究 分担者	新保 一成  (SHINBO Kazunari)  (80272855)	新潟大学・自然科学系・教授   (13101)	

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
---------	---------