

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13551

研究課題名(和文) ネマチックコロイド分子が形成する異方的構造の研究

研究課題名(英文) Study on the anisotropic structure formed by nematic colloidal molecules

研究代表者

木村 康之 (Kimura, Yasuyuki)

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：00225070

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、1粒子内に複数の異なる性質の領域を有したマルチパッチコロイド粒子系で新規構造体が形成されることが報告されている。本研究では、ネマチック液晶中に分散した球状コロイド粒子間相互作用が双極子的であることに着目し、これらを用いた2次元・3次元構造体の作成を行った。その結果、配向が反平行の粒子からなる正多角形構造体、正8角形構造体からなる2次元構造体(アルキメデス格子)、正方形構造体からなる穴あき正方格子構造体、四面体からなるカゴメ格子状構造体など新規構造体の作成に成功した。また、数ボルトの交流電圧下でこれら構造体の1次元サイズが1秒以下の応答時間で最大20%可逆的に収縮することを見出した。

研究成果の概要(英文)：In recent years, it has been reported that a new structure different from conventional ones is formed in a multi-patch colloidal particle system having multiple surface regions with different properties. In this study, we focus on the fact that the interaction between spherical colloidal particles dispersed in nematic liquid crystals is dipolar and we have tried to fabricate 2D / 3D structures composed of these nematic colloids. We succeeded in creating new types of structures such as a regular polygonal structure of antiparallel particles, a two-dimensional structure of regular octagonal structures (Archimedes lattice), a perforated tetragonal lattice structure of square structures, a Kagome-like lattice of tetrahedrons. We also found that one-dimensional size of these structures can reversibly shrinks by up to 20% in less than 1 second under AC electric field of several volts.

研究分野：ソフトマター物理学

キーワード：コロイド分子 ネマチック液晶 光ピンセット コロイド構造体 電場応答

1. 研究開始当初の背景

コロイド分散系の研究は基礎・応用双方の観点から活発に研究されてきたが、形状が球形でかつ粒子間相互作用が等方的な系が主に対象とされてきた。これらの系が示す安定構造は2次元では六方格子、3次元ではFCCあるいはHCPとなる。近年、より複雑な構造体を作成することを目指し、異方性形状を有する粒子系や2種類以上のサイズ・物性等が異なる球状コロイド系を用いた研究が進展している。

一方、コロイド粒子系は原子・分子系のモデルとしても広く研究されてきた。等方的相互作用のみを考えた場合には、原子系が複数の化学結合により形成する複雑な構造を再現することは困難である。しかし、ごく最近、複数の引力相互作用領域を表面に有したマルチパッチ粒子が作成され、これらが複数の結合ポンドを持つ“分子”と見なすことができることから、コロイド分子と呼ばれて注目されている。例えば、Granickら(Nature, 2011)は性質の異なる3つの部分からなるトリブロックヤヌス粒子を用いて、2次元カゴメ格子コロイド構造体を自己組織的に作成することに成功している。

我々はこれまで、分子の重心位置が液体と同様に無秩序であるが方向に秩序を有するネマチック液晶に分散したマイクロスケールのコロイド粒子間の相互作用に関する実験的、理論的研究を行ってきた。ことに、液晶の配向場と静電場とのアナロジーに立脚した静電アナロジー理論が粒子間力を定量的に説明可能であることを明らかにした(PRE, 2008,10,11,13)。この理論によれば、ネマチック液晶中のコロイド粒子(以下、ネマチックコロイド粒子とよぶ)は電気双極子あるいは電気4重極子と同様の振舞いを示し、粒子間力に複数の斥力と引力方向が存在する。従って、粒子は他の粒子と安定的な結合が可能な複数の異方的結合ポンドを持つことになり、ネマチックコロイド粒子が新しいタイプのコロイド分子と見なせるとの着想を得た。

2. 研究の目的

本研究ではマイクロスケールのネマチックコロイド粒子を用いて、粒子間の異方性結合による新しい2次元および3次元構造体を実現し、その電場などの外場に対する応答性を明らかにすることを目指した。

3. 研究の方法

表面配向処理したシリカ粒子あるいは高分子コロイド粒子をネマチック液晶中に分散させ、これを電場、光電場勾配等を用いて集積し、通常のコロイド系では実現不可能な種々の複雑な構造体を作成する。この際に、まず、エネルギー的に安定な構成単位を作成し、これを組み合わせることで階層的に、よりエネルギーの低い作成経路を経て構造体を作成

することで効率的かつ安定に構造体の作成を行う。また、粒子の向き制御の実現が本研究では鍵となるが、光ピンセットをマイクロスケールの熱源として利用し、粒子近傍の液晶を局所的に融解した後急冷することで、確率的にその方向制御を実現した。また、交流電場を用いて構造体のサイズを変化させて、その構造体の電場によるサイズ制御を行った。

4. 研究成果

水平配向セル中における鎖状構造を基本とする2次元構造体作成に関しては、我々の研究も含めていくつかの報告があり、本研究申請時にすでに我々は枝分かれ鎖からなる2次元樹状構造体や中空菱形格子の作成に成功していた(Proc. of SPIE, **9164**, 9164O (2014).)。

一方、垂直配向セル中での構造体に関しては、A. Nychらによる3次元最密充填格子(Nat. Commun. 2013)による報告のみであった。そこで、本研究では垂直配向セル中での新規の構造体作成を試みた。

(1) 環状(正多角形)構造体の作成

光ピンセットによる液晶の局所融解現象を用いて確率的に双極子型液晶コロイド粒子(以下、D粒子と呼ぶ)の方向制御を行い、反平行D粒子を交互に配列することで1次元鎖状構造体を作成した(図1上)。2つの反平行鎖から幅の太い鎖状クラスターを作成することが可能と考えられるが、側面方向には斥力相互作用の寄与が大きいため簡単には側面どうしでの結合が起こらないことがわかった。その代わり鎖の両端間には強い引力相互作用が働いているために、光ピンセットにより極性が逆の反平行鎖を接近させると自発的に環状構造体を形成することがわかった(図1中)。また、3次元的な幾何学的制約により12角形以上の多角形は不安定で容易によりコンパクトな構造体へと変形することもわかった。さらに、正8角形構造体を順次結合させることで正8角形を単位構造とする1次元鎖や2次元格子の作成(図1下)にも成功した。特に、作成された2次元格子は正方形と正8角形から構成されている2次元アルキメデスタイル格子となっている。また、上記のような階層的構造体作成法を用いることでさまざまな新規構造体を作成できることを示すことができた。[雑誌論文]



図1 D粒子からなる直鎖構造体(上)、8角形環状構造体(中)、2次元アルキメデスタイル格子(下)。

(2) 最密構造を基本単位とする擬2次元構造体の作成

よりエネルギー的に安定な構造体を基本単位とする新規構造体作成を目指した。D粒子では互いに反平行な粒子 2×2 個からなる中性の四角形構造と 3×1 個からなる四面体構造が対応する。前者を用いて2次元正方格子が作成可能なことはA. Nychら(Nat. Commun. 2013)が報告しているが、これらを用いて任意サイズの穴あき四角形構造の作成に成功した(図2上)。これらは(1)の環状構造より安定である。一方、四面体構造からは四面体からなる4, 5, 6角形構造体を、さらに6角形構造体からはカゴメ格子状の構造体の作成(図2下)に成功した。〔雑誌論文〕

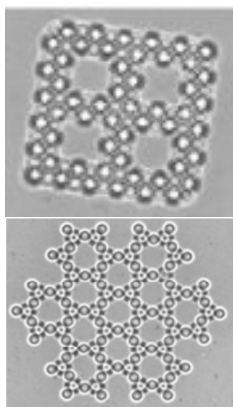


図2 D粒子からなる穴あき正方格子(上)、カゴメ格子状構造体(下)。

(3) 作成された2次元構造体の電場応答

液晶はディスプレイとして利用されていることから明らかなように低い電場でもその配向を容易に制御することが可能である。本研究では作成された構造体に交流電場を印加してその変形を調べた。その結果、電場により粒子近傍の液晶の配向が一様になるために構造自体が電場方向に引き伸ばされ、面内の粒子間隔が狭くなり、2次元平面内で構造体の収縮が観測された。その1次元サイズの収縮率は環状構造、四角形構造、四面体構造ともに10V程度の電場で20%以上も収縮し、巨大電歪効果を示すことが明らかとなった。また、収縮は可逆的かつ1秒以内に起こることがわかった。これらの特徴は構造体の動的制御が可能で従来の方溶液中でのコロイド構造体と比べ、著しい特徴と言える。〔雑誌論文〕

(4) 構造体の自己組織的形成

複雑な構造体を階層的に作成することでさまざまな新規構造体を準安定な経路により作成することに成功したが、その基本構造を自己組織的に作成可能であれば、より効率的に構造体作成を行うことが可能となる。このために、液晶をセルに注入する際に電場を印加し基本構造体の自己組織的形成を試みた。この結果、種々の長さの鎖状構造体、正6-8角形の環状構造体、正方形構造体、四面体構造体など比較的小さな構造体が自己組織的に形成されることが明らかとなった。さらに電場により、四面体構造や鎖状構造など極性のある構造体を空間的に分離可能であることも明らかとなった。

(5) 液晶液滴の光駆動回転現象

構造体形成に流体相互作用などの動的な相互作用を利用できれば、より効率的に自己組織的な構造形成が実現される。本研究ではこのための基礎として、液晶液滴をさまざまな偏光を有する光ピンセットを用いて回転させ、その回転運動制御を目指した研究を行った。

複屈折を有する粒子に円偏光を照射するとその複屈折性のために回転トルクが粒子に与えられることが知られている。本研究では重水中に液晶を分散させ、力学振動により種々のサイズの液滴を作成し、それを直線偏光あるいは円偏光した光ピンセットで捕捉し、液滴の運動を高速カメラにより調べた。その結果、ネマチック液晶液滴では円偏光により液滴が自転し、その自転方向は円偏光の向きと一致すること、自転速度は照射するレーザー強度に比例することがわかった。また、コレステリック液晶では液晶の掌性と同一円偏光のみで回転し、その自転速度は照射するレーザー強度に比例することがわかった〔雑誌論文〕。今後、複数液滴を光駆動する系を実現し、液滴の回転方向、回転速度を液滴単位で制御しつつ、流体相互作用による構造体形成に関する研究を推進する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計3件)

Continuous rotation of a cholesteric liquid crystalline droplet by a circularly polarized optical tweezers,
Yuta Tamura and Yasuyuki Kimura,
Proc. of SPIE, 査読有, **10252**, pp.102520 W-1~3 (2017).
DOI: 10.1117/12.2269410

Two-dimensional assemblies of nematic colloids in homeotropic cells and their response to electric fields,
Yuta Tamura and Yasuyuki Kimura,
Soft Matter, 査読有, **12**, pp. 6817 ~ 6826 (2016).
DOI: 10.1039/C6SM00929H

Fabrication of ring assemblies of nematic colloids and their electric response,
Yuta Tamura and Yasuyuki Kimura,
Applied Physics Letters, 査読有, **108**, pp. 011903 -1 ~ -4 (2016).
DOI: 10.1063/1.4939627

〔学会発表〕(計10件)

Y. Tamura and Y. Kimura, "Continuous rotation of a cholesteric liquid crystalline droplet by a circularly polarized optical tweezers", Optical Manipulation Conference 17, 2017/4/19-21, パシフィコ横浜, 口頭発表

田村優太、木村康之。「液晶液滴の回転運動」, 第 122 回日本物理学会九州支部例会, 2016/12/10, 福岡大学, 口頭発表

田村優太、木村康之。「ネマチックコロイドを用いた異方的構造体作製」, ソフトマター研究会, 2016/10/24-26, 北海道大学, ポスター発表

田村優太、木村康之。「ネマチック液晶中での異方的構造体作製とその電場応答」, 第 67 回コロイドおよび界面化学討論会, 2016/9/22-24, 北海道教育大学旭川校, 口頭発表

Y. Tamura and Y. Kimura, "Fabrication of anisotropic colloidal assemblies in nematic liquid crystal", 第 8 回日伊液晶会議, 2016/7/5-7, 京都市国際交流会館, ポスター発表

木村康之。「エキゾチックな粒子間相互作用によるコロイド構造体の形成」, 第 5 回ソフトマター研究会, 2015/12/17-19, 東北大学, 招待講演

田村優太、木村康之。「ネマチックコロイドを用いた異方的構造体とその電場応答」, 第 5 回ソフトマター研究会, 2015/12/17-19, 東北大学, ポスター講演 (最優秀ポスター賞)

田村優太、木村康之。「ネマチックコロイドを用いた異方的構造体」, 第 121 回日本物理学会九州支部例会, 2015/12/5, 九州工業大学, 口頭発表

田村優太、木村康之。「ネマチックコロイドが形成する異方的構造体」, 第 66 回コロイドおよび界面化学討論会, 2015/9/10-12, 鹿児島大学, 口頭発表

Y. Tamura and Y. Kimura, "Two-dimensional non-close-packed nematic colloidal assemblies and their response to electric field", 13th European Conference on Liquid Crystal, 2015/9/07-11, University of Manchester, UK, ポスター発表

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等
<http://sm.kyushu-u.ac.jp/~kimuralab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 康之 (KIMURA, Yasuyuki)
九州大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号: 00225070

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

岩下 靖孝 (IWASHITA, Yasutaka)
九州大学・大学院理学研究院・助教
研究者番号: 50552494

荒木 武昭 (ARAKI, Takeaki)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 20332596

(4) 研究協力者

()