

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：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287100

研究課題名(和文)交流アクティブマイクロレオロジーを用いたソフトマターのメゾダイナミックスの解明

研究課題名(英文)Elucidation of meso-dynamics of soft matter using AC active microrheology

研究代表者

木村 康之(Kimura, Yasuyuki)

九州大学・理学(系)研究科(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) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：ソフトマター複雑流体の構造とダイナミックスを解明するためには、そのメソスケールでの応答に関する知見を得ることが必要である。本研究では、ミクロンサイズの粒子をプローブとして、ソフトマター中に分散し、光ピンセットを用いて粒子を振動させた際の、粒子変位の振幅と位相遅れを測定することで、媒質中の局所力学物性(マイクロレオロジー)測定が可能な交流アクティブマイクロレオロジー測定システムの開発を行った。また、レーザー光でプローブ粒子を照射した際に入射光と散乱光の干渉により生じるホログラムから、複数粒子の3次元変位の同時観測を可能にするホログラフィック顕微鏡を作成し、複数の自己駆動粒子の3次元追跡を実現した。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the structure and dynamics of soft matter complex fluids, it is necessary to obtain knowledge about their response at mesoscale. In this study, we have developed an AC active microrheology measurement system to study the local mechanical properties of soft matter. We measured the amplitude and phase lag of displacement of a micron-sized probe particle under AC external force applied by optical tweezers. We also developed a holographic microscope that enables simultaneous observation of three dimensional displacement of multiple particles from a hologram caused by interference between the incident and the scattered light when probe particles are irradiated with laser light. With this method, we succeeded in tracking of multiple self-propelled particles in three dimension.

研究分野：ソフトマター物理学

キーワード：マイクロレオロジー 光ピンセット 複素力学応答スペクトル ホログラフィック顕微鏡 3次元追跡

1. 研究開始当初の背景

高分子・液晶などの弱い相互作用で結びついた分子性物質からなるソフトマターの大きな特色は、その内部に特徴的な形態を有するナノからマイクロスケールにわたるメソスコピックサイズの構造体が階層的に存在する点にある。例えば、代表的なソフトマター複合系である細胞系では、異種のソフトマター界面およびそれらで囲まれた微小空間において、生命現象に重要な物質輸送や機能の発現がおこっている。これらマイクロ機械システムともいべき細胞をはじめとした生体構成器官の細胞スケールでの自律運動や機能発現を理解するために、従来は個々の構成分子レベルまで立ち返り、それらの間の特異的な生化学的相互作用を中心とした、いわば個別の「部品」に関する研究が進められてきた。しかし、細胞をはじめとした生体システムのメソスコピックスケールでの生命現象を理解するためには、このような分子レベルでの知見に加えて、次の段階として、個々の機能がより大きなスケール(以下ではメソスケールと呼ぶ)において、「どのようにして集約・統合・制御されるか?」を理解する必要がある。このためには、舞台となるメソスケールでのソフトマターの構造や動的物性(ダイナミクス)と、ソフトマター中の物質輸送をはじめとした局所力学物性との関係を解明することが不可欠となる。しかし、従来のレオメーター等による巨視的な力学測定法を用いて得られる粘弾性などの物性量は、あくまで巨視的なスケールにわたる平均値であり、個々の内部構造に対応した情報を分離して検出することは本質的に困難である。しかし、ソフトマターのメソスケールでの構造やダイナミクスを理解する上で、各構造に対応したさまざまな時空間スケールにおいて力学物性測定を行い、それらに関する知見を得ることは必要不可欠である。このような問題意識のもと、我々は以下に述べるような新しい局所力学(粘弾性)測定法の開発を目指した。

2. 研究の目的

本研究では、マイクロサイズのコロイド粒子をソフトマター中に分散し、光ピンセットによりトラップしつつ、交流外場を印加して、それに対する粒子の変位を、粒子からの回折光を用いて広帯域・高精度で測定することにより、動的局所力学物性(以下、マイクロレオロジーと呼ぶ)を3次元かつメソスケールの分解能で行なう測定システムの開発とそれを用いたソフトマターの物性測定を行うことを目指した。

3. 研究の方法

生体系をはじめとしたソフトマターからなる複雑流体の構造とダイナミクスを理解するためには、そのメソスケールでの空間的・時間的構造に関する知見を得ることが必

要である。しかし、従来、メソスケールの空間分解能で、その力学的特性を非破壊的かつ3次元的にその場測定できる汎用の方法は存在しない。本研究では、まず、マイクロレオロジーをメソスコピックスケールの分解能で測定可能な、交流アクティブマイクロレオロジー測定システムを開発した。具体的にはメゾサイズのプローブ粒子をソフトマター複雑流体中に分散し、これらをレーザーピンセットで捕捉しつつ、各位置で交流的力学刺激および電氣的刺激に対する粒子の複素変位応答(振幅と位相遅れ)を、広い時間スケールにわたり高精度で測定した。また、多粒子の変位を同時に3次元的に観測可能な方法としてホログラフィック顕微鏡による3次元ビデオマイクロレオロジーを実現した。

4. 研究成果

(1) 交流アクティブ(能動的)マイクロレオロジー測定システムの開発とその評価

レーザートラップした単独のコロイド粒子をプローブとして、交流力学振動および交流電場を印加して、その際の粒子の位置変位を観測するための光学系を市販のマルチポートを有する倒立型電動顕微鏡を利用して組み上げた。本研究では、粒子位置検出には半導体レーザーを用い、プローブ粒子から回折光(あるいは粒子像)を4分割フォトダイオード上に結像させて、得られた電気信号を高速ADボードによりコンピュータに取り込み、コンピュータ上で解析を行うことで、ナノメートルの精度でのリアルタイム位置測定を実現した。また、粒子位置駆動には高出力の固体レーザー光を用い、AO光回折装置によりその位置を高速に変化させることで実現した。

次に、作成したアクティブマイクロレオロジー光学系の補正とこれを用いた複素粘性率スペクトル測定法の評価を行った。水中でトラップした数マイクロのポリスチレン粒子を駆動用のレーザーで強く捕捉し、そのレーザーの方向をAOD回折器により周期的に変化させることで、粒子位置を1Hz~5kHzの範囲で正弦的に振動させた。この際、測定される駆動レーザー光の変位信号および粒子位置の変位信号を同時に、それぞれ4分割フォトダイオードを用いて検出することでその複素振幅を測定した。得られた2つの信号の振幅の比および位相差から、媒質の複素粘性率スペクトル測定を1Hz~5kHzの帯域で行った。この際、機械的共振等によると考えられる、印加した振動とは異なる複数の周波数を持つ振動が観察され、特に印加電場周波数が高周波になるとこれらに対して変位信号強度が相対的に減少するため、検出用のADボードの分解能(ビット数)が測定周波数限界を制限していることがわかった。今後、より高分解能のADボードを用いるか、ロックイン検出を用いることで広帯域化を目指す予定である。

(2) ホログラフィック顕微鏡を用いた3次元粒子追跡法の開発

4分割フォトダイオードを用いた位置検出は、高速・高精度の測定が可能であるが、観測できる粒子が1つに限定される点で、多粒子を用いたマイクロレオロジー測定は困難である。そこで、本研究では複数の粒子の3次元位置の同時測定が可能であるホログラフィック顕微鏡を開発し、3次元粒子追跡を実現した。具体的には、コリメートされたLED照明による得られるホログラム像をCCDカメラで撮影し、得られた画像をレーリー・ゾンマーフェルトの回折理論を用いて、その3次元光場をデジタル的に再構成し、その光場を用いて粒子位置を推定する測定系を開発した。従来、レーザー光を用いたホログラフィック顕微鏡がほとんどであるが、高コヒーレンス性がかえってあたとなり、バックグラウンドノイズを増加させ、良好なコントラストのホログラムを得ることがしばしば困難な欠点がある。光源をLEDにすることで高さ30-40ミクロンまでの領域では良好なホログラムが得られることがわかった。また、ゲルや高粘性の溶媒を用いて粒子を固定した系を用いて実際の高さ補正を行うことで、定量的に十分な測定精度での位置検出が可能であることが明らかとなった。さらに、開発されたシステムを用いて流体相互作用しつつ沈降する複数粒子系の運動や自己駆動液滴の3次元軌跡の運動測定を実現した。

(3) ホログラフィック光ピンセットを用いた多粒子同時駆動系の実現

通常の光ピンセットではレーザーを分割するか、AODを用いて空間的なスキャンをすることで、複数粒子の駆動が実現される。一方、空間変調素子(SLM)を用いたホログラフィック光ピンセット(HOT)では複雑なパターン状に複数の粒子を捕捉することが可能である。我々は、円環上に3次元的にトラップした粒子を独自に開発したHOTを用いて軌道角運動量を与えて円環上を回転させる系を実現し、その系で観測される集団運動を調べた。その結果、低レイノルズ流体中でのミクロなレオロジーが特徴的な集団運動を生み出すことが明らかとなった。さらに、粒子間の流体力学的相互作用を考慮したシミュレーションにより、観測された現象を再現することにも成功した。

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6件)

“Hydrodynamically induced collective motion of optically driven colloidal particles on a circular path”, Yasuyuki Kimura, The Journal of Physical Society of Japan, 査読有, (2017) in press.

“Rhythmic motion of colloidal particles driven by optical force”, Keita Saito and Yasuyuki Kimura, Proc. of SPIE, 査読有, **10252**, 1025203-1~3 (2017).
DOI: 10.1117/12.2269415.

“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**, 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**, 011903-1~4 (2016).
DOI: 10.1063/1.4939627

“Dynamic clustering of driven colloidal particles on a circular path”, Shogo Okubo, Shuhei Shibata, Yuriko Sasa Kawamura, Masatoshi Ichikawa and Yasuyuki Kimura, Physical Review E, 査読有, **92**, 032303-1~11 (2015).
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.032303>

“Dynamics of colloidal particles in electrohydrodynamic convection of nematic liquid crystal”, Kentaro Takahashi and Yasuyuki Kimura, Physical Review E, 査読有, **90**, pp. 012502-1~5 (2014).
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.90.012502>

[学会発表](計20件)

K. Saito and Y. Kimura
“Rhythmic motion of colloidal particles driven by optical force”, Optical Manipulation Conference 17, 2017/4/19-21, パシフィコ横浜, 口頭発表

池田豊和、永徳はるか、岩下靖孝、木村康之
「ホログラフィック顕微鏡を用いたコロイド系の3次元追跡」, 日本物理学会第72回年次大会, 2017/3/17-20, 大阪大学豊中キャンパス, 口頭発表

齋藤圭太、木村康之
「光駆動粒子系のリズム運動」, 日本物理学会第72回年次大会, 2017/3/17-20, 大阪大学豊中キャンパス, 口頭発表

齋藤圭太、木村康之
“Rhythmic motion of colloidal particle driven by optical force”, 2017 アクティブマター研究会,

2017/1/19-20, 九州大学西新プラザ, 口頭発表

永徳はるか、池田豊和、岩下靖孝、木村康之

「コロイド粒子の3次元追跡」, 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

池田豊和、永徳はるか、岩下靖孝、木村康之

「コロイド粒子系のダイナミクス」, 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

齋藤圭太、木村康之

「光駆動コロイド系のリズム運動」, 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

齋藤圭太、木村康之

「円環上で光駆動されたコロイド系のリズム運動」, 第6回ソフトマター研究会, 2016/10/24-26, 北海道大学, ポスター発表

木村康之、大久保省吾、柴田就平

「光駆動コロイド系の非平衡構造形成」, 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

大久保省吾、柴田就平、木村康之

「光駆動コロイド系の非平衡構造形成」, 西日本非線形研究会 2016, 2016/6/25, 九州大学伊都キャンパス, 口頭発表

S. Okubo, S. Shibata, Y. S. Kawamura and Y. Kimura,

“Collective motion of hydrodynamically coupled micro-objects driven by optical force”, The 3rd Optical Manipulation Conference (OMC'16), 2016/5/18-20, パシフィコ横浜, 招待講演

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作成」, 第5回ソフトマター研究会, 2015/12/17-19, 東北大学, 招待講演

永徳はるか、岩下靖孝、木村康之

「コロイド粒子系のダイナミクス」, 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

木村康之、大久保省吾、柴田就平

「光で駆動されたコロイド粒子の集団運動」, 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

S. Okubo, S. Shibata, Y. S. Kawamura and Y. Kimura,

“Collective behavior of the optically driven particles on a circular path”, International Symposium of Fluctuation and Structures out of Equilibrium, 2015/8/20-23, 京大紫蘭会館, ポスター発表

高橋健太郎、岩下靖孝、木村康之

「液晶電気対流を用いた非平衡ダイナミクス」, 第70回日本物理学会年次大会, 2015/3/21-24, 早稲田大学, 口頭発表

大久保省吾、岩下靖孝、木村康之

「円環上を運動する微粒子の流体相互作用による集団運動」, 第120回日本物理学会九州支部例会, 2014/12/6, 崇城大学, 口頭発表

高橋健太郎、岩下靖孝、木村康之

「液晶電気対流による粒子輸送ダイナミクス」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014/9/7-10, 中部大学, 口頭発表

大久保省吾、岩下靖孝、木村康之

「光で駆動されたコロイド粒子の集団運動」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014/9/7-10, 中部大学, 口頭発表

S. Okubo, S. Shibata, Y. S. Kawamura and Y. Kimura,

“Collective behavior of the optically driven particles on a circular path”, SPIE2014, Optical Trapping and Optical Micromanipulation XI, 2014/8/17-21, San Diego Convention Center, San Diego. U.S.A.

〔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

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

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