

平成24年 3月 31日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20340113

研究課題名（和文）3次元マイクロレオロジーを用いたソフトマターの時空間階層構造の解明

研究課題名（英文）Study on spatio-temporal hierarchical structure in soft matter by three-dimensional microrheology

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

研究成果の概要（和文）：

本研究では、複雑な内部構造を持つソフトマターのメソスケールでの局所的相互作用や力学的性質を3次元かつメソスケールの分解能で測定可能な手法の開発を行った。そのために、3次元位置走査が可能な2ビーム光ピンセット、および三次元的に複数の位置での光トラップが可能なマルチビーム光ピンセットを新たに開発した。さらにこれらを用いて、(1)液晶中で粒子間に働く長距離相互作用の測定、(2)単一ベシクルの力学応答測定、(3)二分子膜ラメラ系のメソスケールでの線形・非線形粘性測定、(4)流体力学的に結合した粒子の集団運動の観察などに成功した。

研究成果の概要（英文）：

In this study, we developed a new technique that can be measured mesoscopic local interactions and mechanical properties in soft matter which has a complex internal structure with a resolution of meso-scale in three-dimension. We developed a two-beam optical tweezers which can scan a sample in three dimensions and a multi-beam optical tweezers which can trap particles at different positions in three-dimensions. Using these systems, we measured (1) a long-range interaction between particles in a liquid crystal, (1) mechanical response of a single vesicle, (3) mesoscopic linear and nonlinear viscosity in bilayer lamellar system, (4) collective motion in hydrodynamically coupled particles.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・化学物理，生物物理

キーワード：ソフトマター、光ピンセット、マイクロレオロジー

1. 研究開始当初の背景

生体系をはじめとして、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、その空間的・時間的不均一構造に関する情報を得ることが必要である。しかし、従来、メソスコピック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方法は世界的にもほとんど存在しない。

2. 研究の目的

本研究では、ナノサイズのコロイド粒子をソフトマター複雑流体中に分散し、交流外場（力学振動、電場）に対する粒子の変位を広帯域・高精度で測定することにより、内部構造および局所力学物性（マイクロレオロジー）の測定を3次元的かつメソスコピックスケールの分解能で行うことを目指す。このため、本研究課題では直径数十～数百nmサイズのプローブ粒子1個をレーザートラップして、試料中を移動させながら各点における媒質の力学的応答を測定する方法を開発する。一方、多粒子をレーザートラップし、その運動をリアルタイム観測することで、ソフトマター中でのダイナミクスの空間的不均一を観測することを目指した。

さらに、このシステムを用いて生体の最も基本的なモデルである2分子膜系や生体高分子系を中心としたソフトマター複合系の階層的構造およびダイナミクスとその内部における局所力学物性との関係を明らかにすることが可能となる。このようなモデル系で得られた構造変化とダイナミクスの相関に関する知見は細胞融合や細胞分裂等の際の物質輸送や力学的物性の変化など、生命現象の基本的な理解に不可欠な情報を提供し、メソスコピック生体システムの機能解明にも大きな寄与をすることが期待できる。

3. 研究の方法

既設の機器および本研究で導入した新規の機器を利用して、(A)電動倒立蛍光顕微鏡、高出力赤外線レーザー、ピエゾミラーで構成される2ビーム光ピンセットシステム、および、(B)倒立光学顕微鏡、高出力赤外線レーザー、空間光変調器(SLM)で構成されるマルチビーム光ピンセットシステムの開発を行なう。新たに開発されたこれらの光ピンセットシステムを用いて、メソスケールのプローブ粒子を光トラップし、その運動あるいは変位を測定することにより、種々のソフトマター中におけるメソサイズの空間スケールにおける局所的な相互作用や力学物性の測定を行なう。

4. 研究成果

本研究により、新たに(A)電動倒立蛍光顕

微鏡、高出力赤外線レーザー、ピエゾミラーで構成される2ビーム光ピンセットシステム、および、(B)倒立光学顕微鏡、高出力赤外線レーザー、空間光変調器で構成されるマルチビーム光ピンセットシステムの開発を行なった。(A)のシステムではピエゾ素子により位置制御された対物レンズを用いることで、トラップしている粒子位置を3次元的に走査することが可能であり、これにより試料の力学物性の3次元的な情報を得ることが可能になった。また、(B)のシステムでは3次元的に異なる位置に複数の粒子を光トラップすることに成功し、3次元的な同時測定を実現した。具体的なソフトマターの対して得られた新たな知見および成果の代表的なものを以下に述べる。

(1) ネマチックコロイドの相互作用

水などの液体中に分散したコロイド粒子間にはファンデルワールス力や遮蔽クーロン力が働き、これらのバランスにより分散状態が決定されている。これに対して液晶などの構造流体中では、その内部構造に起因した特徴的な相互作用が働き、コロイド系の安定性に重要な役割を果たす。本研究では、方向秩序を有する液体であるネマチック液晶中に分散したコロイド粒子(ネマチックコロイド)間相互作用を調べた。

同じサイズの粒子間に働く粒子間力

同一サイズの2つの粒子・欠陥対が平行かつ同方向を向く場合、粒子間に働く力 F は粒子間距離 R が大きい場合には引力でかつ R^{-4} に比例する。一方、 R が小さい場合、点欠陥が粒子間に存在するため、粒子は互いに接近できず、粒子間力に斥力成分が発生することがわかった。このとき、粒子間力の距離依存性から算出された粒子間引力ポテンシャルは数ミクロンの距離で数万 $k_B T$ であり、通常のコロイド粒子間力に比べて桁違いに強いことがわかった。さらに、実験で得られた粒子間力の距離依存性と液晶の弾性理論を用いた理論シミュレーションの結果が広い粒子間距離範囲にわたり極めてよく一致することが明らかにした。[論文1]

拘束された空間での粒子間力

セルによる空間的閉じ込めが粒子間力に与える影響を楔形のセルを用いて測定した。セル厚 L が減少すると粒子間力は減少し、かつ短距離になることが明らかとなった。このとき、種々の L で得られた結果をスケールすると単一のマスター曲線に従うことがわかり、かつ液晶の弾性理論を用いた理論曲線と極めてよい一致を示した。[論文2,3]

異なるサイズの粒子間に働く粒子間力

液晶中では、粒径の異なる粒子間に働く力は、粒子の配置に依存して力の大きさが異なる

ることが見出した。この現象を理解するためにさまざまな粒径を持つ粒子間での粒子間力のシミュレーションを行い、実測された粒子間力概形の再現に成功した。[論文 1, 6]

(2) ジャイアントベシクルの物性測定

両親媒性分子であるリン脂質は水中で会合し、2分子膜を形成する。我々は細胞膜のモデル系として、脂質ベシクルの力学的性質を光ピンセットにより測定した。

測定では中性脂質 DOPC と荷電脂質 DOPG からなる混合脂質ベシクルをその中に閉じ込めた 2 個のコロイド粒子を光ピンセットで操作することでベシクルを変形させた。ベシクルは球形、レモン型、管状部分の生成といった形態転移を示し、これに伴いベシクルにかかる力が変化することが明らかとなった。測定により得られた力曲線から脂質膜の曲げ弾性および表面張力などの力学物性に関する情報を得ることに成功した。[論文 7]

(3) 2 分子膜系の空間拘束効果の研究

メソスコピックスケールの界面が作る構造の例として界面活性剤 2 分子膜と水層が交互に 1 次元配列したラメラ構造がある。我々はこれまでにラメラ構造中のナノ粒子の輸送現象に階層的空間構造に起因した時間的階層構造が存在することを報告してきたが、本研究では特に長時間スケールでの粒子輸送のダイナミクスを行った。このような長時間での輸送現象には構造欠陥が深く関わっていると予想されるが、実際、ガラス系で特徴的に観測されるトラップ - ジャンプ型の運動が観測された。また、粒子の平均 2 乗変位の時間依存性には、長時間で異常拡散から通常の拡散へのクロスオーバーが観測された。さらに、このような能動的測定に加えて、光ピンセットを用いた粘性測定を行ったところ、欠陥構造の緩和に起因すると思われる非線形挙動 (shear thinning および降伏応力の存在) が観測された。[論文 4]

(4) 3 次元マルチ光ピンセットの開発

空間光変調器 (SLM) を用いて、位相ホログラムにより任意形状の光パターンを作成するマルチ光トラップシステムの開発とその評価を行なった。任意の画像パターンから SLM 上に表示する位相パターンを高速で作成するプログラム開発を行ない、数十個のコロイド粒子を同時捕捉し、これらを複雑なパターン上に配列することに成功した。さらに、レンズ効果を位相パターンに重畳することで 3 次元的な粒子トラップを実現した。開発したシステムを用いることで、任意の配置での 3 次元的な局所情報の計測が可能となった。さらに、レーザーの波面が回転する光渦を作成し、粒子に角運動量を与えることにも

成功した。その際、同一半径の円周上に粒子をトラップしつつ、これらに角運動量を与え、その平均速度の充填密度依存性を調べた。その結果、流体力学的相互作用に起因した速度増加を観測することに成功した。これらの知見はマイクロ流路中での粒子操作の際の有用な知見を与えるものと考えている。[発表 16, 17]

(5) 円軌道を駆動される粒子の時空間ダイナミクス

マルチ光ピンセットシステムで作成した光渦を用いて、円軌道上に光トラップされた複数粒子に一定の角運動量を与えた際の粒子運動の研究を行なった。この系は粒子間相互作用がある非平衡開放系のモデル系として興味深い。その結果、各粒子には一定の駆動力が印加されているにもかかわらず、粒子を等間隔に配置した初期状態から実験を開始した場合にも、複数の粒子からなるクラスターの形成や破壊が自発的に起こり、隣接粒子間の角度差や各粒子速度の平均速度からのゆらぎにリミットサイクル振動が現れることがわかった。さらに、実験的に得られた結果を線形安定性解析および流体力学相互作用を考慮した運動方程式によるシミュレーションとの比較を行い、この系の時空間ダイナミクスを議論した。さらに、粒子の運動方向を周期的に変化させた場合やサイズの異なる粒子を用いた場合の運動に関して実験を行い、新たな知見を得ることに成功した。[発表 1, 3, 4, 8, 論文投稿中]

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 9 件) すべて査読有

1. T. Kishita, N. Kondo, K. Takahashi, M. Ichikawa, J. Fukuda and Y. Kimura
“Interparticle force in nematic colloids -comparison between experiment and theory”,
Phys. Rev. E, vol. 84, 021704-1-9 (2011).
DOI: 10.1103/PhysRevE.84.021704
2. N. Kondo, Y. Iwashita and Y. Kimura
“Temperature and confinement effect on the interparticle force in nematic colloids”
Mol. Cryst. Liq. Cryst. vol. 545, 115-122 (2011).
DOI: 10.1080/15421406.2011.568880
3. N. Kondo, Y. Iwashita and Y. Kimura
“Dependence of interparticle force on temperature and cell thickness in nematic colloids”

- Phys. Rev. E, vol. 82, 020701(R)-1-9 (2010).
DOI: 10.1103/PhysRevE.82.020701
4. N. Yamamoto, M. Ichikawa and Y. Kimura
“Local mechanical properties of a hyperswollen lyotropic lamellar phase”
Phys. Rev. E, vol. 82, 021506-1-8 (2010).
DOI: 10.1103/PhysRevE.82.021506
 5. H. Uemura, M. Ichikawa and Y. Kimura
“Crossover behavior in static and dynamic properties of a single DNA molecule from three to quasi-two dimensions”
Phys. Rev. E, vol. 81, 051801-7 (2010).
DOI: 10.1103/PhysRevE.81.051801
 6. T. Kishita, K. Takahashi, M. Ichikawa, J. Fukuda and Y. Kimura
“Arrangement dependence of interparticle force in nematic colloids”
Phys. Rev. E, vol. 81, 010701(R)-1-4 (2010).
DOI: 10.1103/PhysRevE.81.010701
 7. Y. Shitamichi, M. Ichikawa and Y. Kimura
“Mechanical properties of a giant Liposome studied using optical tweezers”
Chem. Phys. Lett., vol. 479, 274-278 (2009).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cplett.2009.08.018>
 8. Y. Kimura
“Microrheology of soft matter” (Invited Review)
J. Phys. Soc. Jpn., vol. 78, 041005-1-8 (2009).
DOI: 10.1143/JPSJ.78.041005
 9. K. Kita, M. Ichikawa and Y. Kimura
“Self-Assembly of Polymer Droplets in Nematic Liquid Crystal at Phase Separation”
Phys. Rev. E, vol. 77, 041702-1-4 (2008).
DOI: 10.1103/PhysRevE.77.041702

[学会発表](計27件)

1. 柴田就平, 津田雅俊, 佐々百合子, 岩下靖孝, 木村康之
「円環上を駆動されたコロイド粒子の構造形成」
日本物理学会第66回年次大会(2010年3月28日), 新潟大学.
2. 木村康之, 近藤昇, 木下隆裕, 福田順一

- 「ネマチックコロイドの粒子間相互作用」
日本物理学会第66回年次大会(2010年3月28日), 新潟大学.
3. 佐々百合子, 岩下靖孝, 木村康之
「流体力学的相互作用により誘起されたコロイド粒子の集団運動」
日本物理学会第66回年次大会(2010年3月25日), 新潟大学.
 4. 佐々百合子, 山本直樹, 岩下靖孝, 木村康之
「円環上での光で駆動されたコロイド粒子の集団運動」
日本物理学会2010年秋季大会(2010年9月25日), 大阪府立大学.
 5. Y. Kimura
“Nematic colloids-their specific interaction & exotic structures”
The 3rd International Kyushu Colloid Colloquium (September 23, 2010), Fukuoka, Japan.
 6. 近藤昇, 岩下靖孝, 木村康之
「液晶場を介した粒子間相互作用」
2010年日本液晶学会討論会(2010年9月6日), 九州大学.
 7. T. Kishita, K. Takahashi, M. Ichikawa, J. Fukuda and Y. Kimura
“Interparticle force in nematic colloids”
International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter 2010 (August 17, 2010), Nara, Japan.
 8. Y. Sassa, N. Yamamoto, Y. Iwashita and Y. Kimura
“Collective dynamics of driven spheres on a one-dimensional ring”
International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter 2010 (August 17, 2010), Nara, Japan.
 9. Y. Kimura, N. Yamamoto, and M. Ichikawa
“Local mechanical property of defective lyotropic lamellar phase”
Fifth Pacific Rim Conference on Rheology (August 5, 2010), Sapporo, Japan.
 10. M. Ichikawa, H. Uemura and Y. Kimura
“Crossover behavior of a single DNA molecule in a quasi-two dimensional system”
Fifth Pacific Rim Conference on Rheology (August 5, 2010), Sapporo, Japan.
 11. M. Ichikawa, H. Uemura and Y. Kimura
“Crossover behavior of a single DNA molecule in a quasi-two dimensional system”
Fifth Pacific Rim Conference on Rheology (August 5, 2010), Sapporo,

- Japan.
12. N. Kondo, Y. Iwashita and Y. Kimura
“Temperature and confinement effect on the interparticle force in nematic colloids”
23rd International Liquid Crystal Conference (July 13, 2010), Krakow, Poland.
 13. Y. Kimura, K. Takahashi, J. Fukuda and M. Ichikawa
“Interparticle Force in Nematic Colloids - Comparison between Experiment & Theory”
23rd International Liquid Crystal Conference (July 13, 2010), Krakow, Poland.
 14. M. Ichikawa, H. Uemura and Y. Kimura
“Crossover behavior of a single DNA molecule in a quasi-two dimensional system”
International Soft Matter Conference 2010 (July 6, 2010), Granada, Spain.
 15. 近藤昇, 市川正敏, 木村康之
「液晶場を介した粒子間相互作用」
日本物理学会第65回年次大会(2010年3月20日), 岡山大学.
 16. 山本直樹, 佐々百合子, 岩下靖孝, 木村康之
「ホログラフィック光ピンセットを用いたソフトマターの物性測定(1)」
第115回日本物理学会九州支部例会(2009年12月5日), 宮崎大学.
 17. 佐々百合子, 山本直樹, 岩下靖孝, 木村康之
「ホログラフィック光ピンセットを用いたソフトマターの物性測定(2)」
第115回日本物理学会九州支部例会(2009年12月5日), 宮崎大学.
 18. 木下隆裕, 市川正敏, 木村康之
「液晶中での特異的コロイド粒子間相互作用」
日本物理学会2009年秋季大会(2009年9月26日), 熊本大学.
 19. 近藤昇, 木下隆裕, 市川正敏, 木村康之
「液晶中における粒子間相互作用の温度変化」
日本物理学会2009年秋季大会(2009年9月26日), 熊本大学.
 20. 山本直樹, 市川正敏, 木村康之
「ラメラ相の局所力学物性」
日本物理学会2009年秋季大会(2009年9月25日), 熊本大学.
 21. 山本直樹, 市川正敏, 木村康之
「リオトロピックラメラ相の局所物性測定」
日本物理学会第64回年次大会(2009年3月30日), 立教大学.

22. 木下隆裕, 市川正敏, 木村康之
「液晶中のコロイド粒子間相互作用～実験とシミュレーション～」
日本物理学会第64回年次大会(2009年3月30日), 立教大学.
23. 木村康之, 高橋賢治, 市川正敏
「液晶分散コロイド粒子に働く配置に依存した相互作用」
日本物理学会2008秋季大会(2008年9月22日), 岩手大学.
24. 山本直樹, 市川正敏, 木村康之
「2分子膜系のマイクロレオロジー」
日本物理学会2008秋季大会(2008年9月21日), 岩手大学.
25. Y. Kimura, K. Takahashi, J. Fukuda and M. Ichikawa
“Interparticle Force between Colloidal Particles in Nematic Liquid Crystal-Experiments and Simulations”
22th International Liquid Crystal Conference (July 4, 2008), Jeju, Korea.
26. N. Yamamoto, M. Ichikawa and Y. Kimura
“Dynamics of Colloidal Particles in Lyotropic Lamellar Phase”
22th International Liquid Crystal Conference (June 28, 2008), Jeju, Korea.
27. Y. Kimura, K. Takahashi, J. Fukuda and M. Ichikawa
“Interparticle force between colloids in nematic liquid crystal”
International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter (June 3, 2008), Kyoto.

〔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://mag.phys.kyushu-u.ac.jp/>

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

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

(3) 連携研究者

()
研究者番号：