
会場 F

領域 12

F-1

球の自由落下運動における記憶効果

大分大学 ^A 野口大^A, 岩下拓哉 ^A

液体中でブラウン運動するコロイド微粒子の自己速度相関関数は応答関数と結びつくことが揺動散逸定理として知られている。粒子と流体の密度比が近い場合、速度相関関数は指数関数的減衰ではなく、時間に対してべき的減衰を表す。いわゆるロングタイムテールと呼ばれるものである。したがって、応答関数も同様にべき的振る舞いを示すことがわかる。本研究では、コロイドの応答関数を巨視的実験から測定することを目的とし、液体中を自由落下する球をモデル系とする。粘度 η と密度 ρ_f をもつ液体中で自由落下運動をする半径 a の球は、レイノルズ数が 1 より小さく、液体と球の密度が近い場合、下記の BBO(Basset-Boussinesq-Oseen) 方程式に従う。

$$\frac{d\tilde{v}(t)}{dt} = 1 - \tilde{v}(t) - \sqrt{9/\pi(2m_p/m_f + 1)} \int_0^{\tilde{t}} \frac{1}{\sqrt{\tilde{t}-\tilde{\tau}}} \frac{d\tilde{v}}{d\tilde{\tau}} d\tilde{\tau}$$

ここで、 $\tilde{v}(t) = \frac{v(t)}{v_\infty}$, $m_p = \frac{4\pi a^3 \rho_p}{3}$, $m_f = \frac{4\pi a^3 \rho_f}{3}$, $\tilde{t} = \frac{t}{\tau_p}$, $\tilde{\tau} = \frac{\tau}{\tau_p}$, $\tau_p = \frac{m_p + m_f/2}{6\pi\eta a}$, v は球の速度, v_∞ は終端速度であり, $v_\infty = \frac{(m_p - m_f)g}{6\pi\eta a}$, t は時間, ρ_p は球の密度である。コロイド粒子の世界と同等の環境 ($Re \ll 1$ かつ $\rho_f \sim \rho_p$) を巨視的な実験系で実現できれば、応答関数を直接観測することができる。本研究では、定量的な議論を進めるために、高粘度な PVA を液体として用い、直径 3.18[mm] のナイロン球を自由落下させることにより、実際の実験データと数値解析のデータを比較検討し、マクロな球での履歴力の効果を検証することで、液体中で自由落下する球がどのような振る舞いをするのかを確認する。

F-2

弱い乱流による非熱的 Brown 運動の速度相関関数と記憶関数

九州大学^A, 山口大学^B 梅野大智^A, 鳴海孝之^B, 河野真也^A, 岡部弘高^A, 石田謙司^A, 日高芳樹^A

時空間的に不規則な流れである乱流は、これまで多くの研究が行われてきた。しかし、そのほとんどは乱れが十分に強く完全に無秩序な「発達乱流」についてのものである。一方、乱れが弱く局所的に秩序構造の残る「弱い乱流」については、秩序と無秩序の共存による困難さのため、まだ十分な研究がなされていない。弱い乱流の研究対象として、液晶に電圧を印加することで生じる「液晶電気対流」がある。液晶電気対流では、液晶の分子配向と対流の相互作用によって弱い乱流が生じる。これまで、弱い乱流に混入した微粒子の運動を観測する手法によって、その乱流拡散の性質が調べられてきた。この手法は、Brown 運動とのアナロジーから、「非熱的 Brown 運動」と呼ばれる。Brown 運動は、微粒子にはたらく力を溶媒からのランダム力と摩擦力に分けて表す Langevin 方程式で記述される。非熱的 Brown 運動に対しても同様の考え方で、マクロ Langevin 方程式 [1]

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\Gamma \mathbf{v} + \Xi(t)$$

が提案され、実験データを適用することによって乱流拡散の性質解明が試みられてきた。ここで、 m は微粒子質量、 $\mathbf{v}(t)$ は微粒子の速度、右辺第 1 項は乱流から微粒子にはたらく摩擦力 (Γ は摩擦係数)、第 2 項は乱流から微粒子にはたらくランダム力を表す。しかし、弱い乱流には局所的な秩序と大局的な無秩序が共存した時空構造が存在するため、より正確に現象を表すためには Γ は定数ではないと考えられる。このような、時空構造のある系の Brown 運動の記述には、摩擦項を一般化した一般化 Langevin 方程式

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\int_0^t \Gamma(\tau) \mathbf{v}(t-\tau) d\tau + \Xi(t) \quad (1)$$

が用いられる。ここで、 $\Gamma(\tau)$ は記憶関数と呼ばれる。揺動散逸定理から導かれる関係 $\Gamma(\tau) \propto \langle \Xi(\tau) \cdot \Xi(0) \rangle$ から、記憶関数によって、微粒子が乱流から受けるランダム力の統計的性質がわかる。そこで、一般化 Langevin 方程式から記憶関数を得る手法を提案することが本研究の目的である。そのために式 (1) から微粒子の速度相関関数と記憶関数の関係を導出し、実験的に得られた速度相関関数から記憶関数を得ることを試みた。

[1]K. Tamura, Y. Hidaka, et al.: J. Phys. Soc. Jpn. 70, 2805 (2001)

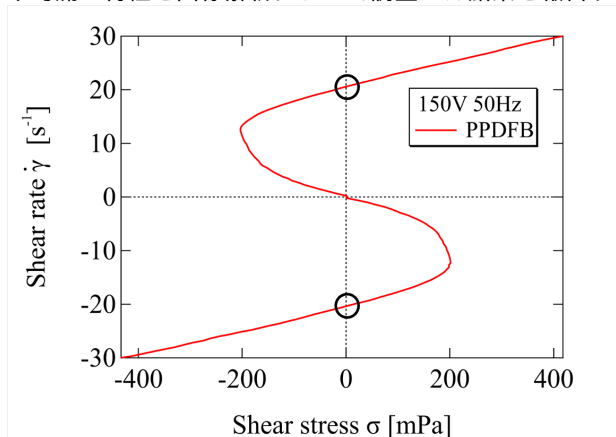
F-3

三環フッ素系液晶の負の粘性状態における平均流の観測

大分大院工^A, 北大院工^B, 北大電子研^C, 大分大理工^D 米良天翔^A, 武田純^B, 折原宏^{B,C}, 氏家誠司^D, 長屋智之^D

ある種のネマチック液晶に低周波の交流電場を印加すると、対流が誘起され、電圧がある閾値以上となると、見かけの粘性が負の値を示す。負の粘性状態では、液晶は乱流状態であり、乱流の中に試料全体にわたる一方向の平均流が自発的に生じる。図に三環フッ素系液晶である PPDFB におけるせん断速度制御でのせん断応力測定の結果を示した。丸印で示した部分に注目すると、せん断速度をもっているにもかかわらず、せん断応力が 0 を示していることから、液晶が自ら流れているといえる。平均流の大きさは、印加する電圧の強度や周波数に応じて変化する。本講演では、電場の印加領域を限定できるパターン電極セルを用いて PPDFB における

平均流の特性を画像解析によって調査した結果を報告する。



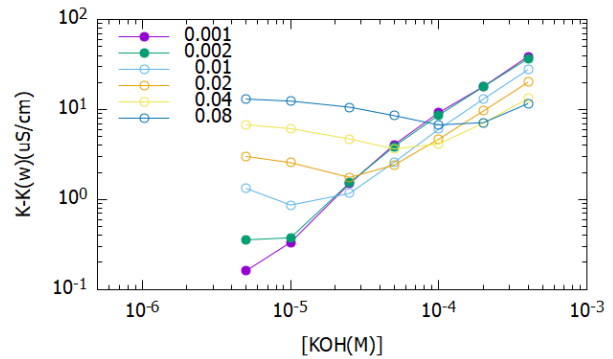
F-4

電気伝導度測定による荷電コロイドの電荷とイオン強度の決定

大分大学^A 山下優衣^A, 岩下拓哉^A

一般にコロイド粒子を水中に分散させると、コロイド表面の解離基が解離し、帯電することが知られている。また、無塩系では、解離から放出されたイオンが荷電コロイド粒子の周囲に電気二重層を形成する独特な系を構成する。これら粒子表面の電荷と電気二重層は粒子間の相互作用に大きな影響を及ぼす重要な要素であるが、それを実験的に決定することは容易ではない。本研究では、大気平衡下にある荷電シリカコロイド水溶液を研究対象とする。コロイド水溶液の電気伝導度測定と化学平衡式によるモデリングにより、コロイド体積分率や KOH アルカリ添加時により帯電量や溶

液のイオン強度がどのように変化するかを定量的に調べる。

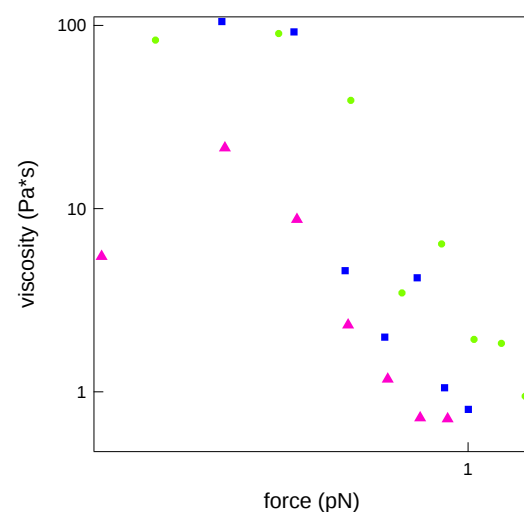


F-5

局所的外力及び巨視的外場印加下における濃厚コロイド懸濁液の非線形レオロジー

九州大学大学院理学府^A, 九州大学大学院理学研究院^B 上村泰生^A, 水野大介^B, 江端宏之^B, 荊原佳祐^A, 吉良和真^A

ソフトマターに外力を印加することでみられる非線形な流動特性は、コロイド粒子間の相互作用とダイナミクスに起因する。そこで本研究では、微視的な粒子のダイナミクスから濃厚系の非線形流動を理解することを目的として、ガラス転移点近傍の濃厚コロイド懸濁液の1つの粒子に対してフィードバック制御された光捕捉力を加え、力に対する粘弾性応答と粒子の変位を観測した。実験の結果、ストークスの式から求めた実効粘性率は、牽引力の増加に対して減少し、一定以上の力を加えると一定となる非線形な変化がみられた。さらに本研究では、試料に巨視的な外場を印加することによる粘弾性の変化について調べるために、コロイド懸濁液の試料に巨視的に均一なずり場を印加し、その状態でレーザーを用いた牽引実験を行った。



F-6

画像相関を用いたコロイド分散系のダイナミクス

九大理^A, 九大院理^B 田中僚^A, 河野龍之介^B, 貞松知里^B, 小林史明^B, 木村康之^B

近年、差分動的顕微鏡法 (Differential Dynamic Microscopy : DDM) がソフトマターのダイナミクス解析において幅広く使用されている [1]。DDM は時間差 Δt で撮影された 2 枚の画像の差分をフーリエ変換して中間相関関数を導出し、粒子の動的挙動に関する情報を取得する手法である。また、粒子追跡を行わずに平均 2 乗変位 (MSD) などを得ることもできる。

例として、直径 500nm のコロイド粒子分散液に DDM を適用して得られた中間相関関数 $f(q, t)$ を時間依存性を図 1 に示す。異なる曲線は異なる波数での結果を示している。さらに、 $f(q, t)$ を指数関数であてはめを行うことで、図 2 に示す緩和時間 τ の波数 q 依存性が得られた。Einstein-Stokes 則から計算した理論値 (図 2 の実線) と比較すると両者はよく一致しており、DDM のダイナミクス測定法としての有効性が確認できる。当日は、DDM を他の系に適用した結果についても議論する。

[1] R. Cerbino and V. Trappe, Phys. Rev. Lett. **100**, 188102 (2008).

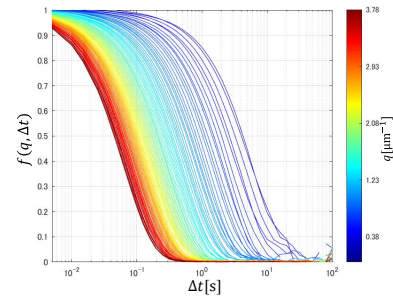


図1. DDMから得た中間相関関数

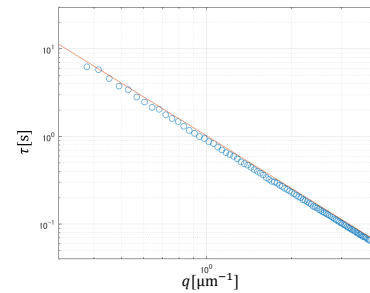


図2. DDMから得た緩和時間 τ の波数 q 依存性。

F-7

電場駆動粒子の集団運動

九大理^A, 九大院理^B 池上広征^A, 河野太一^B, 湯浅康雄^B, 小林史明^B, 木村康之^B

近年、群れの物理学としてアクティブマターの研究が盛んに行われている。その研究では、大腸菌の集団から鳥の群れなどミクロからマクロまで多種多様な系を対象として群れの物理としての普遍性を見出すことは重要な命題である。

本研究では、人工アクティブ粒子の代表例である、電場を印加すると粒子が自転しながら、自走するクインケ回転粒子の集団運動を対象として実験を行った。従来は主に直流電場を印加する研究が行われ、群れ運動や渦運動が報告されている。本研究では、印加電場として矩形波を用いて、そのデューティ比を変えた際の集団運動の様子を調べた。

その結果、非対称性が大きい場合には、サイズの大きな単一渦が生成し (図 1)、非対称性が小さい場合には、小

さな複数の渦を形成する (図 2) ことが分かった。さらに各デューティで PIV を用いた流れ場の解析を行い、局所流速や形成された渦の性質を調べた結果を報告する。

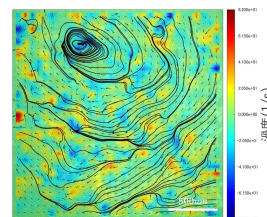


図1 デューティ比90の場合の渦度と流線。(スケールバーは500μm)

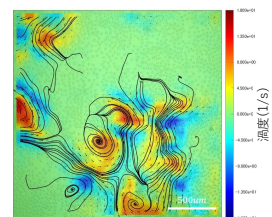


図2 デューティ比40の場合の渦度と流線。(スケールバーは500μm)

F-8

自走油滴の運動モードの解明

九大院理^A 久保凜恩^A, 津田健吾^A, 木村康之^A

界面活性剤溶液中に液晶液滴を分散させると、液滴はマランゴニ対流によって駆動し、自走することが近年報告されている。液晶相ではらせん的な運動を示すことが知られており、一方で、内部に秩序を持たない等方相ではランダム運動と直線運動のみが報告されていた。しかし、等方相においても界面活性剤の濃度を低くした場合ではらせん運動を示すことがわかった(図1)。本研究では、濃度や液滴の大きさを変えた際の運動モードの変化を調べた。その結果、液滴の初期サイズが大きい場合には、液晶の場合と同様に、液滴のサイズの減少に伴って、ランダム運動→らせん運動→停止と運動モードが変化していくことが確認された。しかし、初期サイズが小さい場合には、まず直進運動や曲線運動を示したのちに、

らせん運動を示し、最終的には静止する様子が確認された。図2に示すように、サイズが減少するに従い速度が減少するが、らせん運動を示す場合には、大きな速度を示すこともわかった。

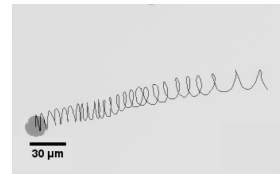


図1. 等方性液滴が示すらせん運動の例。界面活性剤の濃度は7.5%。

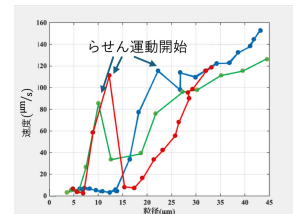


図2. 等方性液滴のサイズ依存性。(赤: 7.5%, 緑: 6.0%, 青: 5.0%)

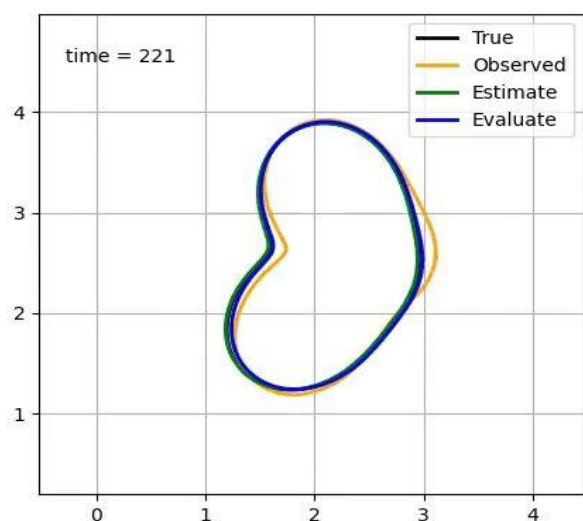
F-9

変形を伴う自己駆動液滴に対するデータ同化

九大院理^A 入倉大輔^A, 多羅間充輔^A

自発的に運動する粒子, アクティブマターは多彩な振る舞いを見せる。私達は, 形状が変化するアクティブマターに注目した。例として, 細胞や, 自己推進する液滴が知られている。これらの変形を伴う自己駆動粒子について, 形状と運動の関係を表す一般的な時間発展方程式のひとつとして Tarama-Ohta model が提案されている。この研究の目的は, 変形を伴う自己駆動粒子の形状と運動の関係性について理解することだ。実験系として, 水溶液に滴下したアルコールの液滴の実験に注目した。Tarama-Ohta model をもとにデータ同化を行い, 方程式を推定することで現象の背後の原理を探る。データ同化とは, モデルの時間発展方程式を用いてシステムの進化を予測し, それに観測データを加味してより正確な状態を求める手法をいう。本発表では, まず, モデルを数値計算により解いて得た仮想的な観測データに対してデータ同化による推定を行い, 推定解と真の解を比較することで手法の有効性を

確認する。さらに, ノイズ強度と推定精度について議論する。



F-10

空間拘束下のアクティブ流体が示すキラルな振舞を記述するミニマルモデル

九大院理^A 松清洋輝^A, 福田順一^A

バクテリア集団は、特徴的なサイズを持つ渦を形成することが知られており、濃厚なバクテリア懸濁液はそのような渦が複雑に入り乱れる、バクテリア乱流と呼ばれる振舞を示す。我々は、容器壁などの境界存在下でのバクテリア乱流の振舞を、Toner-Tu-Swift-Hohenberg (TTSH) 方程式と呼ばれる連続体方程式 [1] に基づくシミュレーションで調べている。我々はこれまでの研究 [2] で、TTSH 方程式にすべり境界条件を課して解くシミュレーション手法を提案し、その結果、境界に沿った流れ(エッジカレント, 以下 EC)の実現に成功した。さらに、EC の向きの時間的な振動を発見した。本研究では、我々のモデルにキラル項を導入し、その影響を調べる。結果を図 1 に示す (EC の向きは正・負が左回り・右回りに対応)。キラルティの導入により、振動が非対称になり (図 1 の下)、さらにキラル項の係数を大きくしていくと、最終的に EC は振動せず、一方向に維持されることがわかった。

参考文献：

- [1]Wensink et al. (2012), *PNAS*, 109(36), 14308-14313.
- [2]Matsukiyo and Fukuda (2024), *PRE*, 109(5), 054604.

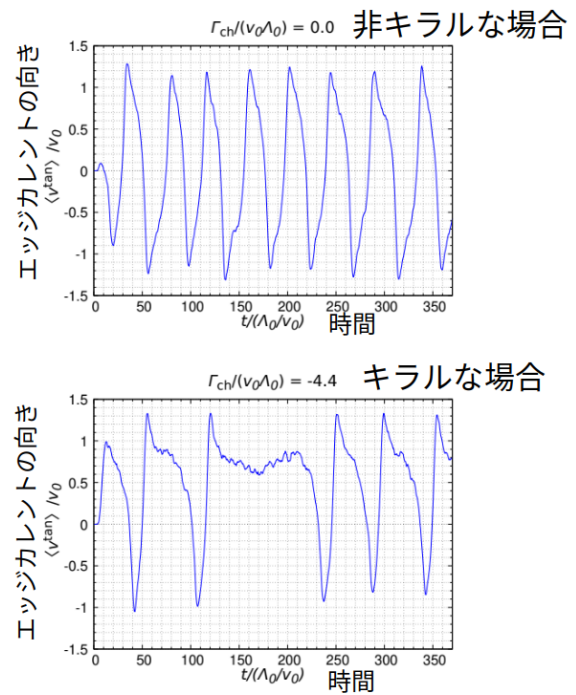


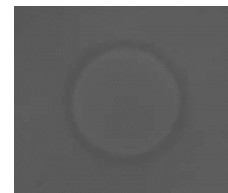
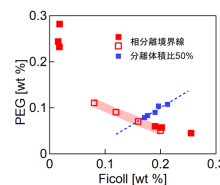
図 1

F-11

アクティブな多成分高分子溶液の臨界点近傍における相分離現象

九大理^A 園田幸大^A, 江端宏之^A, 水野大介^A

細胞内では微細な相分離液滴が重要な生理的機能を担う。平衡系の相分離と異なり、細胞内環境では非平衡揺らぎが生じており、これが相分離液滴の成長に果たす役割は不明である。本研究では、Poly Ethylene Glycol(PEG) と Ficoll の 2 成分混合溶液の相分離現象に、大腸菌の遊走に伴う非平衡揺らぎが与える影響を、顕微鏡観察やレオロジー測定で調べる。まず、PEG と Ficoll の 2 成分混合溶液の相図を作成した (左図)。図の ■ を結ぶ直線は、2 相が同じ体積比で相分離する領域を示しており、この直線と相分離境界線の交点が臨界点であると推定される。この点で観察される相分離液滴 (右図) は、周囲媒質との屈折率差が小さく不明瞭であるが、境界が熱的に揺らぐ様子が観察できた。当日は、図の破線に沿って作製した試料中で大腸菌を遊走させ、相分離現象とレオロジーに与える影響を考察する。



F-12 硬さの異なる基盤上での細胞運動

九大院理^A 中村草平^A, 多羅間充輔^A

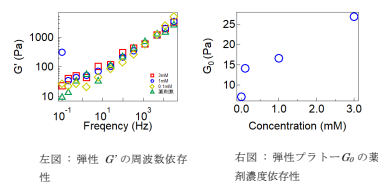
細胞運動において、細胞が基盤の硬い領域へと移動する現象は Durotaxis と呼ばれる [1]。上皮細胞や癌細胞においてもこの現象が報告されていることから、癌転移や創傷治癒の理解に重要である。細胞運動のモデルとして細胞内の生化学反応と細胞の力学的な性質を結合したメカノケミカルモデルが提案されている [2]。本発表では、このモデルに基盤の硬さの影響を取り込み、その運動を評価した結果を報告する。

[1] Lo et al., Biophys. J. 79, 144–152. (2000). [2] Tarama et al., Front Cell Dev Biol. (2022).

F-13 代謝抑制された培養細胞のマイクロレオロジー測定

九州大学理学部^A, 九州大学大学院理学研究院^B 田代大次郎^A, 田尾優樹^B, 江端宏之^B, 水野大介^B

細胞質は細胞小器官やその他の高分子によりガラス化するほど高濃度に混み合っているが、生細胞内部では代謝による能動的な駆動力によって流動化されている。最近になって、HeLa 細胞の代謝を抑制すると生細胞の細胞質は固化し、低周波で弾性プラトーが現れることがわかった。しかし、代謝を連続的に調節したときに、細胞質がどのように固 - 液転移するかは不明である。そこで本研究では、薬剤を用いた ATP 枯渇により MDCK 細胞の代謝を抑制しつつ、その細胞質粘弾性をマイクロレオロジー計測した。その結果、MDCK 細胞においても代謝抑制すると粘弾性は高周波で周波数 0.5 乗に比例し、低周波で弾性プラトーが現れた。さらに代謝抑制剤を強めたところ、高周波帯の粘弾性はほとんど変化せず、低周波帯の弾性プラトーは濃度依存的に上昇した。講演では、以上の結果を踏まえて代謝抑制時の細胞質粘弾性について議論する。

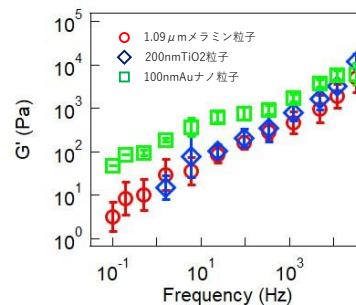


左図：弾性 G' の周波数依存性

右図：弾性プラトー G' の薬剤濃度依存性

細胞内では数十 nm 程度の生体分子機械や細胞小器官が混み合った状態で稼働しているために、 μm サイズの粒子を用いてマイクロレオロジー (MR) を行うと、ガラス的な粘弾性が観測される。そのため nm サイズの粒子を用いれば、ガラス的な特性が発現するミクロなメカニズムを解明できる。また、微細な細胞内構造に直接光捕捉力を印加して操作できれば、細胞内における生体分子機械の機能の理解にも役立つ。本研究では細胞内で数十 nm サイズの粒子を用いた MR 手法の確立を目標とし、50–100 nm の Au ナノ粒子と 200 nm の TiO_2 粒子をプローブ粒子として HeLa 細胞内でアクティブ MR を行った。 TiO_2 粒子を用いて得られた粘弾性は従来計

測されてきた結果に一致した。一方、Au ナノ粒子を用いると、一桁程度大きい粘弾性が計測された。これらの結果を粒子のサイズと吸光特性に着目して議論する。



アクティブMRで計測された粘弾性