

剪断流下での脂質ベシクルとコロイドの相互作用

○細田直樹¹、濱田勉¹、伊藤弘明²、永井健¹

Naoki Hosoda¹ Tsutomu Hamada¹ Hiroaki Itou² Ken H. Nagai¹

¹Japan Advanced Institute of Science and Technology

²Osaka University

【緒言】

近年、白金ナノコロイドがヒト舌癌細胞を阻害する研究や癌細胞に微粒子を吸着させてマーカーの役割を果たすなど粒子が生体に応用されている例が少なくない⁽¹⁾⁽²⁾。当研究室では、マイクロピペットによるリポソーム膜の伸長状態の制御を試みている。その中で張っている膜に光ピンセットを使いコロイドを押し付けると吸着することを見出した。本研究では、剪断応力により伸長した膜上のコロイドの挙動を観察するために下記の微小流路を作製した。生体膜と粒子を吸着させることにより DDS (Drug Delivery System) などの生体医療分野の応用が期待される。

【リポソーム作製法】

・不飽和脂質である DOPC、飽和脂質である DPPC、コレステロール、蛍光標識の Rhodamine-DHPE を使用した。作製方法は、2 種類行い Electro Formation と静置水和法である。Electro Formation では、ITO ガラスに脂質を塗布し、交流電場を印加して作製して静置水和法では、ガラス面にフィルム状に展開した脂質を水溶液中に静置して膨潤させて作製した。

【実験】

・一本道の流路に多数の穴を作製した。リポソーム内外に比重差をつけることで穴に落とすことが出来る。剪断応力下でリポソームが割れることがないため、ガラスに吸着させるよりも簡易的に実験を進めることが出来る。

・光ピンセットで任意のリポソームを穴の空いた微小流路に入れることが出来る

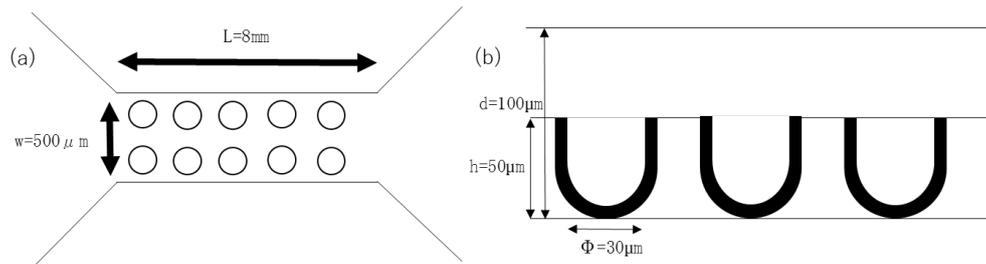


図 1 (a) 流路デザイン (b) 断面図

【結果と考察】

剪断応力下でリポソームにコロイドを吸着させることが出来た。生物にも同様の条件下でコロイドを吸着させることが出来ると考えられる。剪断応力下で回転流に乗って動く脂質膜にコロイドが吸着した瞬間を捉えることが今後の課題である。

【参考文献】

- (1) Y.Saitou et al, Oncology, No.31, pp156-162(2009)
- (2) Xiaobua Huang et.al, fsg, Nanomedicine Vol.2, No.5, pp 681-693(2007)

溶媒中ナノ粒子の流体力学的挙動と溶媒和構造：物理化学と流体力学の横断的解析

(阪大院基礎工) 水田 圭亮、石井 良樹、金 鋼、松林 伸幸

【はじめに】

近年、コロイド分散系において流体力学による直接数値計算などのシミュレーションが開発されてきた。しかし溶質と溶媒と同じくナノサイズになるとこのような手法の妥当性が疑問視される。そこで本研究ではナノスケールの分子動力学(MD)シミュレーションを行うことで、ミクロな物理化学とマクロな流体力学を横断的に解析する。

溶質として大きさの異なるフラーレン C_n ($n=20, 60, 180, 240, 320, 540$) 1 分子、溶媒としてアルゴン分子 160000 分子を用いて GROMACS による MD 計算を行った。アルゴン溶媒の熱力学状態は気液平衡線上にある質量密度 $\rho=1345\text{kg/m}^3$ 、 $T=95\text{K}$ とした。また、この状態でのアルゴン溶媒の粘性率は $\eta=2.0\times 10^{-4}\text{kg/m}\cdot\text{s}$ であった。溶媒分子同士及び溶質-溶媒間の相互作用は Lennard-Jones ポテンシャルを用いた。

【結果と考察】

フラーレン分子の平均二乗変位の長時間領域の傾きから、拡散係数 D を見積もった。これを用いて、ストークス-アインシュタイン式 $a_{\text{HD}}=k_{\text{B}}T/6\pi D\eta$ から流体力学半径 a_{HD} を決定した。 a_{HD} は裸のフラーレンの半径 a と比べて大きく見積もられた。このことはフラーレン分子が周囲のアルゴン分子からなる溶媒和構造を巻き込んで流体力学的挙動を示すことで説明できる。これは物理化学的な分子間の相互作用に直接由来しており、流体力学の体系では記述することができない。物理化学的な粒子-溶媒における界面特性を評価するために、熱力学積分法を用いた溶媒和自由エネルギー ΔG を解析した。フラーレン粒子サイズが大きくなるにつれて ΔG は -1000kJ/mol まで大きく負になった。これはフラーレン粒子の周囲に固定化された溶媒和構造を形成しやすいことを意味している。

さらに、ナノスケールのフラーレンが示す流体力学的挙動を明らかにするために、並進運動の速度相関関数 $C(t)=\langle v(t)v(0) \rangle$ を解析した。流体力学による理論から、速度相関関数が $C(t)\sim (vt)^{-3/2}$ という代数的な減衰を示すことが知られており、これをロングタイムテールという。しかしながら、ナノスケールでロングタイムテールのような流体力学由来の挙動がどのような時間スケールで発生するかは自明ではない。 C_{320} における速度相関関数 $C(t)$ の結果から、流体力学半径 a_{HD} を用いた粘性拡散の時間スケール $\tau_v=a_{\text{HD}}^2/\nu\approx 10\text{ps}$ より長時間領域において、ロングタイムテール $t^{-3/2}$ を示していることがわかった。一方で、短時間側は音波伝播が無視できない領域であり、溶媒は圧縮性流体として扱うことが妥当である。

また、粒子-溶媒間に斥力のみが働くような WCA ポテンシャルを用いて同様の解析を行い、分子間相互作用が結果に与える影響を調べた。 ΔG は正の値をとり、溶媒和構造が形成されないことが予想される。流体力学半径 a_{HD} が裸の半径 a_n とほぼ同程度の大きさであったことからこのことが支持された。

アクチン封入巨大リポソームの繰返し屈伸運動

(名大院理、理研脳研) 瀧口金吾、田中駿介、林 真人

【はじめに】

近年、細胞の運動や形態制御に関する機構についての理解を深めるため、または細胞サイズの分子機械を開発するため、微小管とキネシン/ダイニン、またはアクチンとミオシンと言った細胞骨格と分子モーターの組み合わせからなる運動再構成系を封入させた細胞サイズの巨大リポソームや液滴が構築され利用されている[1, 2]。

【結果と考察】

本発表では、リポソーム内に封入されたアクチンの濃度が、生きた細胞の細胞質に匹敵するならば、分子モーターであるミオシンを利用しなくても、アクチン線維の働きだけで、リポソームを紡錘形などに変形させることが出来ることを明らかにした。

さらにそれらの形状は、外液の浸透圧を変化させることや、蛍光標識された細胞骨格線維の励起光照射による人為的切断によって、球形との間で可逆的に変化させることが可能であった。しかもこれらの、外部刺激、外部環境の変化によって誘導される可逆的な形状変化は反復して行わせることが出来る (Fig. 1) [3]。以上の結果は、アクチン線維の様な可変長の糸状高分子である細胞骨格が、細胞が見せる運動や変形を実現させるための非常に優れた天然素材であることを示している。

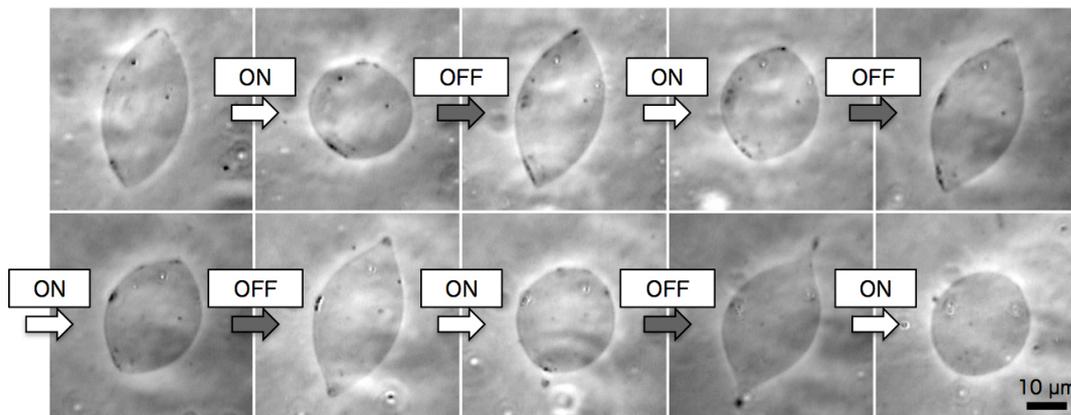


Fig. 1. 内封した蛍光標識アクチン線維の励起光照射による人為的切断と照射終了後に自発的に起こる線維長の回復によって、球形と紡錘形との間で反復変形するリポソーム。写真中の ON/OFF は、その時点における励起光照射の有無を示す。

【参考文献】

- (1) Kubota H *et al.*, Biphasic effect of profilin impacts the formin mDia1 force-sensing mechanism in actin polymerization. *Biophys. J.* 113, 461-471 (2017).
- (2) Sato Y *et al.*, Micrometer-sized molecular robot changes its shape in response to signal molecules. *Science Robotics* 2, aal3735 (2017).
- (3) Tanaka S *et al.*, Repetitive stretching of giant liposomes utilizing the nematic alignment of confined actin. *Comm, Phys.* 1, Article No. 18 (2018).

粗視化分子動力学シミュレーションを用いた高分子溶融体のガラス転移温度の解析

(阪大院基礎工)友重直也, 金鋼, 松林伸幸

【はじめに】

高分子融体はその物理的特性として、鎖長が長くなると絡み合い効果によりダイナミクスが遅くなる。また、冷却すると結晶化せずに容易にガラス化する特徴がある。この2つの性質について粗視化分子動力学(MD)シミュレーションを用いた研究がなされてきたが、絡み合い効果については斥力のみ、ガラス転移については引力を含むカットオフが採用されている。本研究では、2種類のカットオフ距離を用いた粗視化 MD シミュレーションをおこない、絡み合い効果とガラス転移について包括的に解析し、共通点・相違点を調べた。本研究では高分子融体に対する粗視化モデルとして、バネ-ビーズモデルである Kremer-Grest モデルを採用した⁽¹⁾。このモデルでは、高分子のモノマーを排除体積効果のあるビーズとし、結合をのびきり長をもったバネとみなす。セグメント間相互作用のカットオフ距離として、Lennard-Jones (LJ, 引力有り) と Weeks -Chandler-Andersen (WCA, 斥力のみ) の2種類を用意した。また、系の圧力は、 $p = 1.0, 5.0$ としてそれぞれ計算を行った。まず、定圧条件で冷却することによりガラス転移温度を決定した。さらに、ガラス転移点温度より高温にある状態に対して、定温条件で重心の拡散係数を求めた。さらに、拡散係数の鎖長依存性は鎖長 N を 5, 10, 20, 50, 80, 100 の6種類を用いることで調べた。

【結果と考察】

ガラス転移温度は比容積の温度依存性から決められる。WCA を用いると $p = 1.0$ ではガラス転移が起こらないが、圧力を大きくし数密度を上げるとガラス転移が起こることが確認できた。続いて、各温度について、重心の自己拡散係数 D の鎖長依存性を解析し、絡み合い効果の有無を調べた。高分子の希薄極限モデルである Rouse 理論と絡み合い効果を考慮したモデルである reptation 理論⁽²⁾によると、自由鎖では $D \propto N^{-1}$ 、絡み合い効果を考慮すると $D \propto N^{-2}$ となる。この理論と比較して考察すると、ガラス化しない条件では全ての温度域で絡み合い効果が見られた。一方で、ガラス化する条件ではガラス転移温度付近で絡み合い効果が見られず、冪的な $D \propto N^{-1.4}$ の振る舞い示すことがわかった。

【参考文献】

- (1) K. Kremer and G. S. Grest, J. Chem. Phys., 92, 5057 (1990)
- (2) M. Doi and S. F. Edwards, "The Theory of Polymer Dynamics" (1988)

A three-sphere microswimmer in a structured fluid

¹ Department of Chemistry, Tokyo Metropolitan University

² Research Institute for Interdisciplinary Science, Okayama University

Shigeyuki Komura¹, Kento Yasuda¹ and Ryuichi Okamoto²

We discuss the locomotion of a three-sphere microswimmer in a viscoelastic structured fluid characterized by typical length and time scales [1]. We derive a general expression to link the average swimming velocity to the sphere mobilities. In this relationship, a viscous contribution exists when the time-reversal symmetry is broken, whereas an elastic contribution is present when the structural symmetry of the microswimmer is broken [2]. As an example of a structured fluid, we consider a polymer gel, which is described by a “two-fluid” model. We demonstrate in detail that the competition between the swimmer size and the polymer mesh size gives rise to the rich dynamics of a three-sphere microswimmer.

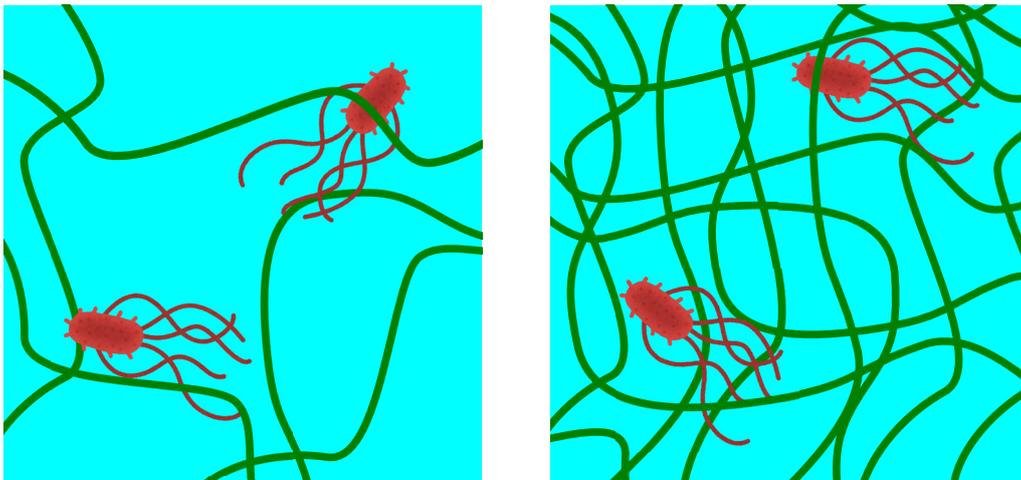


Figure 1. Microswimmers in a structured fluid such as a polymer gel.

References

[1] K. Yasuda, R. Okamoto, and S. Komura, EPL 123, 34002 (2018).

[2] K. Yasuda, R. Okamoto, and S. Komura, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 043801 (2017).

Probability flux of a three-sphere micromachine having different temperatures

Department of Chemistry, Tokyo Metropolitan University.
Isamu Sou, Yuto Hosaka, Kento Yasuda, and Shigeyuki Komura

【Introduction】

Micromachines are tiny machines that swim in a fluid. Therefore it is necessary to consider how to improve the efficiency through a little degree of freedom. Najafi and Golestanian proposed a simple micromachine model in which three in-line spheres are linked by two arms of varying length [1]. Recently, present authors proposed a generalized three-sphere micromachine model in which the spheres are connected by two elastic springs [2]. However, from a practical point of view, it is not a simple task to implement these motions at micron length scale. In this presentation, we suggested a new mechanism for locomotion that is purely induced by thermal fluctuations. We show that an elastic three-sphere micromachine in a viscous fluid can acquire directional motion because of thermal fluctuations when the sphere has different temperatures [3]. In order to understand the physical mechanism, we further investigated probability flux of a micromachine. We first carried out numerical simulation for a two-sphere model. The distribution of the distance between the spheres obeys the quasi-Boltzmann distribution [4]. Next we extended this analysis to the three-sphere micromachine.

【Results and discussion】

The average velocity of the three-sphere micromachine is proportional to the temperature difference $T_3 - T_1$, and the swimming direction is from a colder sphere to a hotter one. When $T_1 = T_3$, the average velocity is zero. We also obtain a quasi-Boltzmann distribution for this thermally driven elastic three-sphere micromachine and calculated the probability flux. We have confirmed the existence of the probability flux loop.

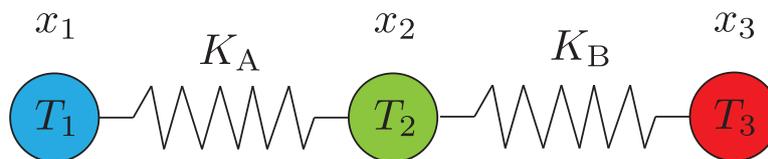


Figure 1: Thermally driven elastic three-sphere micromachine. Three spheres are connected by two harmonic springs with elastic constants K_A and K_B . The time-dependent positions of the spheres are denoted by $x_i(t)$ ($i=1,2,3$) in a one-dimensional coordinate system.

References

- [1] R. Golestanian and A. Ajdari, Phys. Rev. E 77, 036308 (2008).
- [2] K. Yasuda, Y. Hosaka, M. Kuroda, R. Okamoto, and S. Komura, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 093801 (2017).
- [3] Y. Hosaka, K. Yasuda, I. Sou, and S. Komura, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 113801 (2017).
- [4] A. Y. Grosberg and J. F. Joanny, Phys. Rev. E 92, 032118 (2015)

粘弾性ネットワークモデルの亀裂進展に関するスケーリング則と 2次元格子シミュレーション

(お茶の水女子大学) 青柳裕子* 奥村剛

【はじめに】

高分子材料における亀裂進展速度 v はエネルギー解放率 G のべき関数 $G \sim v^\alpha$ で表される領域があることが知られており、ゴム材料においては $\alpha \sim 1/3$ であることが知られている(1)。ポリマーフォームシートの破壊実験では $1/3$ より非常に小さい α が確認されている(2)。このように、 α は材料の種類によって異なるが、これらの現象を説明する理論は部分的にしかなく(3)、さらなる理解が求められている。本研究では、高分子材料をシンプルな粘弾性ネットワークとして取扱い、二次元格子状に配置したバネ・ビーズモデルを用いて亀裂進展シミュレーションを行った。その結果は内容ごとに4つに分けられるが、ポスターでは主に1.と2.について説明し、3.と4.については簡単に紹介する。

【結果と考察】

1. **線形粘弾性体における亀裂進展**(4) ある初期ひずみにおいて亀裂は一定速度で進展し v と G の間にべき則が確認された。この時のべき α はおよそ1である。異なるパラメータによる計算結果を適切に無次元化した軸を用いてプロットし直すと、全てのデータがきれいに一つのマスターカーブに乗ることが確認できた。また、 G は上端と下端をもち、下端はシミュレーションの格子サイズ d とサンプル幅 L の比 d/L によって変化するため、下端をより大きな G から始まるように制御することで、粘弾性体のタフ化が期待できることがわかった。

2. **非線形粘弾性体における亀裂進展** n を非線形指数として弾性が $E\varepsilon^n$ の形で書けるような非線形粘弾性モデルを考えると、 V と G の間に $V/V_c \sim G/G_c^{2n/(n+1)}$ のスケーリング則が導かれた。べき α は $n=1$ の時に1となり線形の場合の結果と一致し、 $n \rightarrow \infty$ の時 α は $1/2$ に近づく。シミュレーションでは d や L によるサンプルのサイズの影響を十分に小さくしていくと、上記のスケーリング則とよく整合することが確認できた。

3. **緩和モデル** 粘弾性体が一つの緩和時間を持つシングル緩和モデルと複数の緩和時間を持つマルチ緩和モデルの2つの場合についてクリープテストと亀裂進展シミュレーションをおこない、その違いを明らかにした。

4. **Static pure shear と Dynamic pure shear** 亀裂進展の実験方法として、ひずみを静的に保つ方法と動的に変化させながら亀裂進展速度を測定する方法が知られている。実験的には同じ材料であっても両者の測定結果は定性的には一致するが定量的には一致しないことが多い。我々の数値計算では、シングル緩和モデルで定性的・定量的に一致し、マルチ緩和モデルでは定性的には一致し、定量的には一致しないことがわかった。

【参考文献】

- (1) A. N. Gent, Langmuir (1996) 12 4492.
- (2) 武居淳, 奥村剛 日本物理学会秋季大会 (2015) 18aCT-7
- (3) B. N. J. Persson and E. A. Brener, Phys. Rev. E (2005) 71 036123
- (4) Y. Aoyanagi and K. Okumura, Polymer (2017) 120 94-99

セル・オートマトンによる凝集詰まりのシミュレーション

(名古屋大学大学院工学研究科 物質科学専攻)

後藤一真、畝山多加志、増淵雄一、山本哲也

【はじめに】詰まりは日常的に起こるが、厳密には解明されていない現象である。本研究では、粒子が細管中を流れ、粒子が細管内に堆積し詰まっていく凝集詰まり⁽¹⁾という現象について考え、粒径が詰まりにどう寄与するかを考える。

【理論】粒子が狭窄部を通過するとき確率 p で吸着することを考える。吸着した粒子は脱離せず、他の粒子に影響を与えない。その時に狭窄部が詰まるまでに必要な個数 n は流路幅に対する相対粒径 a と p を使い期待値により導出できる。

$$n = \frac{\frac{1}{a} + p^2 - p}{p^2} \quad (1)$$

【シミュレーション】Fig. 1のようなモデルを考える。流路を粒子の直径と同じ大きさの正方形のセルに区切る。粒子は上のセルから下のセルへと進む。また粒子は $\frac{1}{3}$ の確率で左右に揺らぐ。粒子が左右に揺らいで壁に衝突する時、確率 p で粒子が吸着するとする。吸着した粒子は脱離せず、新たな壁とみなし粒子の進行を阻害する。したがって粒子は前方と左右のセルの状況を考慮して進むこととなる。このとき、粒子が堆積して粒子の通過が出来なくなるまでに必要になった粒子の個数を求めた。

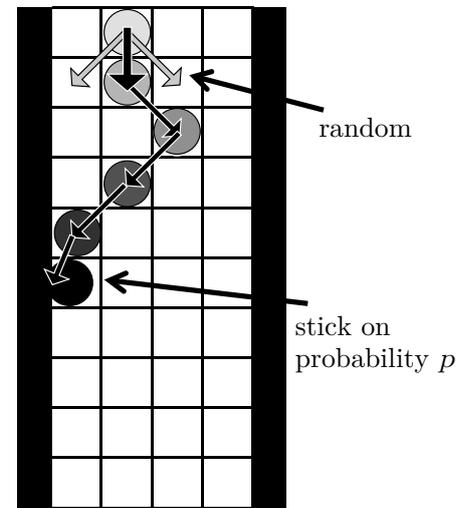


Fig. 1 Simulation model

【結果と考察】Fig. 2に $p=0.4$ の時の粒径と詰まるために必要な粒子数の関係性を数値計算、シミュレーションにより得た結果を示す。粒径が大きい方が詰まるために必要な粒子数が少なくなり詰まりが起りやすく、粒径が小さい方が詰まるために必要な粒子数が多くなり詰まりが起りにくくなるのがわかる。また、粒径が大きいときは理論よりシミュレーションの方が詰まるために必要な粒子数が少なくなっている。このことより理論では考慮されていない堆積した粒子が進行を阻害することが重要になっていると考えられる。対して粒径が小さいときは理論よりシミュレーションの方が詰まるために必要な粒子数が多い。このことは粒子が小さくなり壁に当たることが少なくなり通過する粒子が多くなっていることが原因になっていると考えられる。

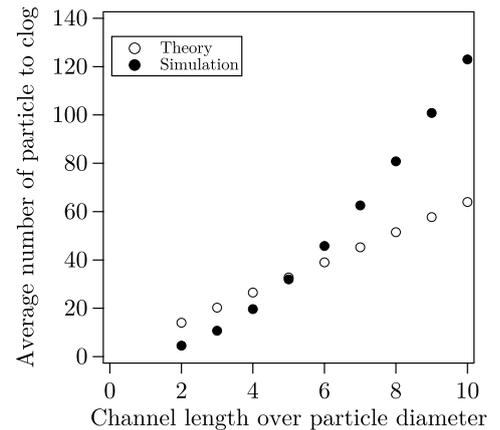


Fig. 2 Particle size dependence of clogging

【参考文献】

(1) E. Dressaire and A. Sauret. Soft Matter, 13(1):37-48, 2017.

Rheological properties of an enzyme suspension

¹ Department of Chemistry, Tokyo Metropolitan University,

² Raymond and Beverly Sackler School of Physics and Astronomy, Tel Aviv University

Yuto Hosaka¹, Shigeyuki Komura¹, David Andelman²

【Introduction】

Active proteins play important roles in catalyzing chemical reactions with the supply of a substrate such as ATP. Recently, non-equilibrium effects induced by these proteins have attracted many interests and have been studied both theoretically and experimentally. For example, a force dipole model was employed to analytically derive diffusion coefficients of a passive object in physiological environments such as a cytoplasm and a surrounding biomembrane [1, 2].

As one of the active systems with ATP-driven proteins, we chose a dilute suspension of active dumbbells under steady shear flow (see Fig. 1). Here active dumbbells represent catalytic enzymes, and we derive the active enzyme viscosity η_a by using the above force dipole model.

The separation between the dumbbell beads is governed by the following Langevin equation:

$$\frac{\partial r_\alpha}{\partial t} = -\frac{2}{\zeta} \frac{\partial U(r, s)}{\partial r_\alpha} - \frac{2k_B T}{\zeta} \frac{\partial \ln \psi}{\partial r_\alpha} + d_{\alpha\beta} r_\beta. \quad (1)$$

Here, $U(r, s)$ is the state-dependent elastic energy which represents the turnover cycle of the actual enzyme.

【Results and Discussion】

By analytically solving the constitutive equation, we find that η_a presents both decreasing and increasing behaviors as the substrate concentration is increased, depending on the physical properties of the binding substrate. For a substrate larger than the enzyme, we see that η_E behaves as if no substrate were present because it does not affect the size of the enzyme.

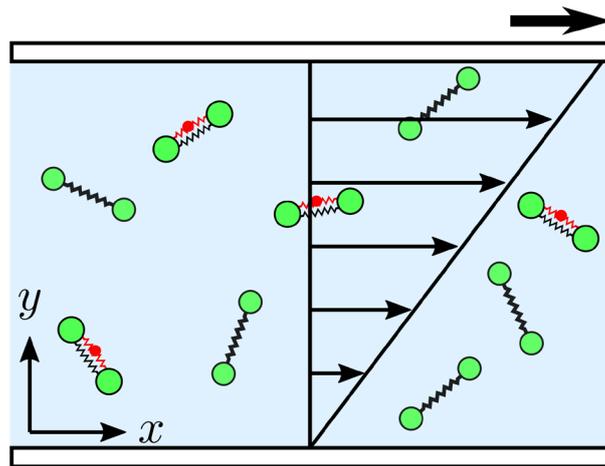


FIG.1 Schematic representation of a dilute suspension of active dumbbells under steady shear flow.

【References】

- [1] A. S. Mikhailov and R. Kapral, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **112**, E3639 (2015).
- [2] Y. Hosaka, K. Yasuda, R. Okamoto, and S. Komura, Phys. Rev. E **95**, 052407 (2017).

光渦を用いたコロイド粒子の周回運動

(九大院理) ○岩本 健太、木村 康之

【はじめに】

多数のコロイド粒子が流体内で運動する場合、粒子間に生じる長距離の流体相互作用のためにその運動が複雑になることは広く知られている。我々はこれまでホログラフィック光ピンセットを用いて作成したリング光渦を用いて、複数のコロイド粒子が同一円周上で周回運動する系の研究を行い、流体相互作用に起因した様々な特徴的運動を観察している¹。今回我々は、リング光渦を同一平面上に2つ配置し、それぞれ光渦上でコロイド粒子を周回運動させた系²での研究を行った。はじめに、モデル系を用いた数値シミュレーションを行い、流体相互作用による特徴的な運動を予測した。次に、対応する実験系の実現を目指して回転楕円体粒子)光渦中における運動の観測を行った。

【結果と考察】

モデル系において粒子は、光渦から円軌道の接線方向に一定の駆動力と円軌道に捕捉する弾性力を受けると仮定した。さらに、流体相互作用としては Oseen 近似を用いて、シミュレーションを行った。2つの光渦で駆動力が同じ場合、初期値によらず2粒子の運動は最終的に同期した。これは流体相互作用により、それぞれの回転半径が変化し、回転速度に差が生じたために同期したと考えられる。図1には駆動力差が存在する場合の2粒子の位相差の時間発展を示す。駆動力差が微小の場合、位相差は一定値に固定される(位相ロック)が、駆動力差が大きくなると位相差が一定保たれる部分と急激に変化する部分が交互に現れるようになる(位相ドリフト)。また、この両状態の境界は、粒子を円軌道にトラップするばね定数の大きさに依存することが分かった。

実験では、軌道角運動量の小さい光渦中において楕円粒子は光軸に対してその長軸を傾けつつ、光軸を中心に一方向に回転することを見出した(図2)。そして2粒子における回転運動は2粒子の回転角の差が一定に固定されることも分かった。詳細は当日発表する。

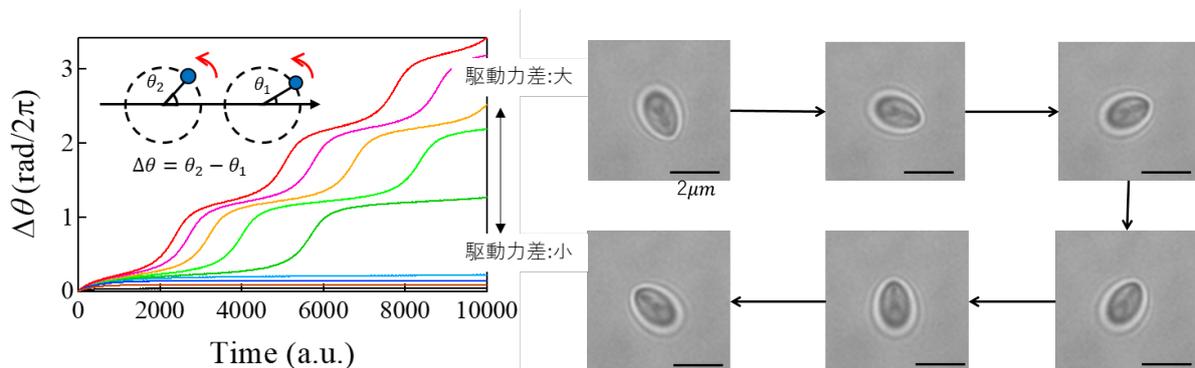


図1：位相差の時間発展.

図2：楕円粒子の回転する様子(反時計回り:27ms 毎).

【参考文献】

- (1) Y. Kimura, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 101003 (2017).
- (2) J. Kotar, L. Debono, N. Bruot, S. Box, D. Phillips, S. Simpson, S. Hanna, and P. Cicuta Phys. Rev. Lett. **111**, 228103 (2013).

内部構造の秩序度合いと force chain の関係

(首都大学東京大学院理工) 沖山綾馬, 栗田玲

【はじめに】

粒子径に分布があり、数マイクロから数ミリの大きさの粒子集団を粉体という。粉体はその粒子径分布と粒子の摩擦によって、force chain と呼ばれる力のネットワーク構造を内部に形成する。force chain は粉体のダイナミクスと密接に結びついていると考えられる。

今回、我々は光弾性法により force chain を観測できるような、二分散系ディスクによる二次元粉体モデルを作成した。粉体モデルを構成するディスクの分散度を変化させることにより、結晶のような格子を作る order と粉体や流体のような無秩序な構造である disorder の二つの構造を作り、分散度の変化に伴う force chain の構造に着目して実験を行った。

【結果と考察】

今回の実験では解析により、粒子ごとの結晶度合いを表すパラメータとしてボンド配向パラメータ

$$\psi_{\ell}^j = \frac{1}{n_j} \sum_k \exp(i \ell \theta_{jk})$$

を各粒子において計算した (n_j は粒子 j の接触粒子数であり、 θ_{jk} は粒子 j と k の中心を結ぶベクトルと水平軸の間の角度、 ℓ は我々が興味を持っている対称性のタイプを指定する)。そして二粒子間における力の大きさとボンド配向パラメータの差に着目すると、order では二粒子のボンド配向パラメータがほぼ等しい部分に力が強くかかっているが、disorder ではボンド配向パラメータの差が大きい部分に力が強くかかっていることを観測した。つまり分散度が増えるにつれて、構造の揃った部分から構造の欠陥の部分に力が移行していき、と考える。

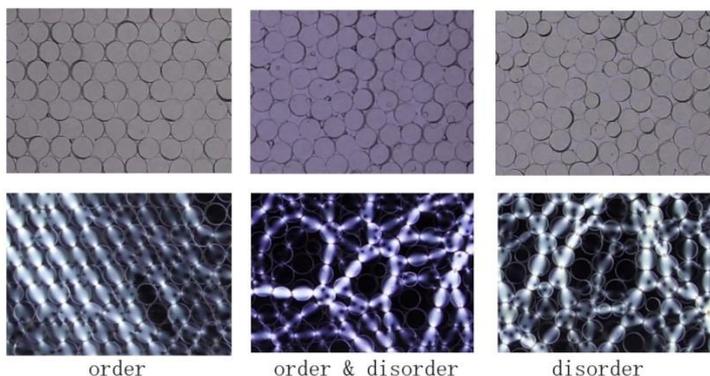


図 1: 粉体モデルにおける各構造

【参考文献】

- (1) K E Daniels, J E Kollmer, and J G Puckett. Rev Sci Instrum, 88(5):051808, 2017.
- (2) N. Iikawa, M. M. Bandi, H. Katsuragi, Phys. Rev. Lett. 116, (2016)
- (3) S. Luding, Adv. Compl. Syst. 04, 379 (2001)

Elastic three-sphere microswimmers in a viscous fluid

¹Department of Chemistry, Tokyo Metropolitan University,

²Research Institute for Interdisciplinary Science, Okayama University

M. Kuroda¹, K. Yasuda¹, Y. Hosaka¹, R. Okamoto², and S. Komura¹

【Introduction】

We discuss a generalized three-sphere swimmer in which the spheres are simply connected by two harmonic springs [1]. The main difference between this model and the previous models is that the natural length of each spring depends on time and is assumed to undergo a prescribed cyclic change. Whereas the arms in the Najafi-Golestanian model undergo a prescribed motion regardless of the force exerted by the fluid [2], the sphere motion in our model is determined by the natural spring lengths representing internal states of a swimmer and also by the force exerted by the fluid. We analytically obtain the average swimming velocity as a function of the frequency of cyclic change in the natural length.

【Results and Discussion】

When the frequency of cyclic change in the natural lengths is smaller than this characteristic time, the swimming velocity increases with frequency. In the high-frequency region, on the other hand, the motion of spheres cannot follow the change in the natural length, and the average swimming velocity decreases with increasing frequency.

We shall also investigate the correlated motion of two three-sphere swimmers. We show that, due to the hydrodynamic interaction between the two swimmers, the average velocities of them can be altered from that of a single three-sphere swimmer.

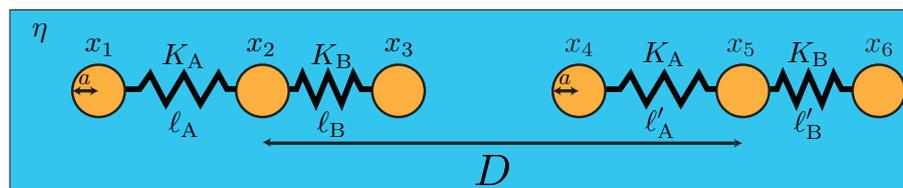


Fig. 1: Two three-sphere microswimmer in a viscous fluid characterized by the viscosity η . Three identical spheres of radius a are connected by two harmonic springs whose elastic constants are K_A and K_B . The natural lengths of the springs, ℓ_A , ℓ_B , ℓ'_A and ℓ'_B , depend on time and are assumed to undergo cyclic change. The distance between two swimmers is denoted by D .

【References】

[1] K. Yasuda, Y. Hosaka, M. Kuroda, R. Okamoto, and S. Komura, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 093801 (2017).

[2] A. Najafi and R. Golestanian, Phys. Rev. E **69**, 062901 (2004).

塗膜の形状と生じるシワの角度の関係

(お茶大院理) 大町麗奈、工藤和恵

【はじめに】

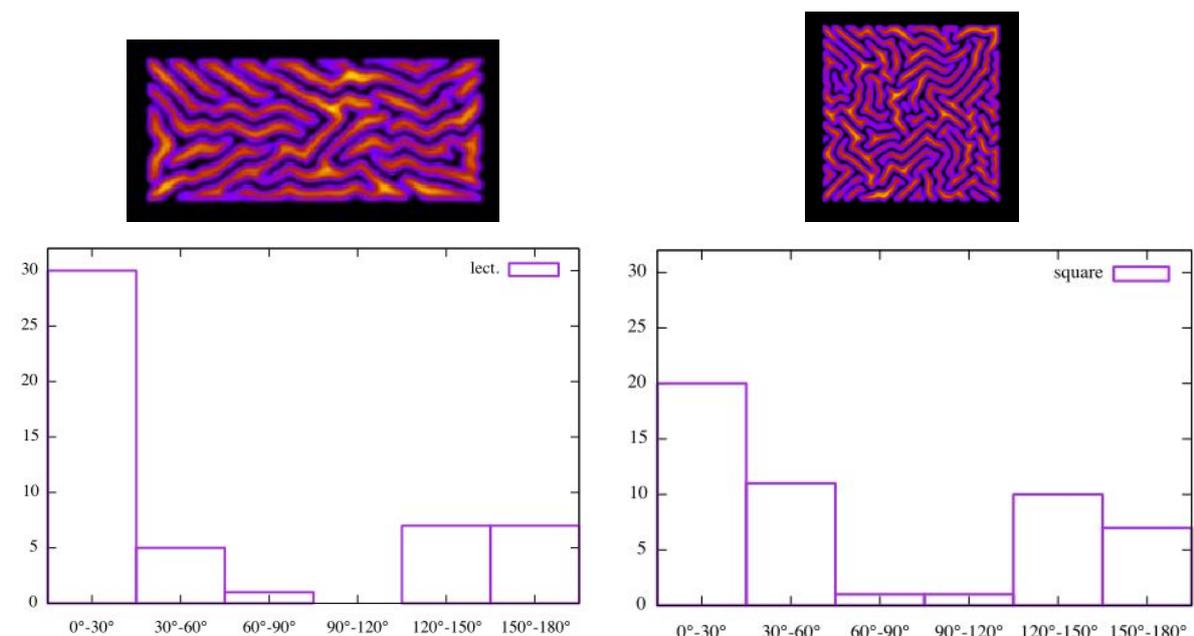
生乾きの塗料に重ね塗りをするとシワが生じることがある。これは塗装やネイルなどの失敗の原因の1つとなっている現象である。例えば油絵で重ね塗りをすると作品にヒビが入ることがあるが、塗料が完全に乾ききるには1日以上必要だと言われており、この例における失敗の原因の1つは最初に塗った塗料が乾き切っていない状態で重ね塗りをしてしまったことである。高分子が含まれている塗料が乾燥する時、高分子と高分子の間には架橋と呼ばれる強い結合が形成される。十分に乾かした後つまり最初に塗った塗料が強い結合で固まり切った後であれば、重ね塗りをしても最初に塗った部分と重ねて塗った部分は干渉せずシワは発生しない。しかし、最初に塗った部分が生乾き状態である時に重ね塗りをすると、重ねて塗った部分の塗料が最初に塗った塗料に溶け込み膨張しシワが発生する。このシワについてどういった条件でどういう形状のものができるかなどを実験で調べるには塗り方や実験環境に限界があるため、我々は現象を数値シミュレーションで再現して研究している。今回はシワが発生する角度について詳しく調べた。

【シミュレーション】

本研究では膜の弾性エネルギーと界面の接着エネルギーの和から成る数理モデルを使用しており、それぞれカルマンの板理論とcohesive zone modelで記述できる。このモデルはシミュレーション結果が線形安定性解析から求められるシワの発生条件を満たしていること及び実験結果と一致していることが確認されているモデルである(1)。

【結果と考察】

上記モデルを用いて計算領域が長方形のものと正方形のもので境界条件は固定端としてシミュレーションすると以下の結果を得られる。さらにこの結果の長辺に生じたシワの角度を測定しヒストグラムであらわしたものが下図(左が長方形、右が正方形)である。長辺に沿ったシワが生じる傾向があることを確認した。結果の詳細は当日報告する。



【参考文献】

(1)M.Shimokawa, H.Yoshida, T.Komatsu, R.Omachi, K.Kudo, Gels 4,41(2018)

接着したベシクルの力学モデル

(東北大学理) 村上 圭, 河野 拓馬, 海老原 隆太, 佐久間 由香, 今井 正幸
(University of Ljubljana, Jožef Stefan Institute) Primoz Zihlerl

【はじめに】

胚形成やオルガノイドに見られるように、多細胞生物では個々の細胞が集団として形成する形態がその機能に大きく関わってくる。特に胚形成過程における細胞の接着の様子は生物種によって大きくことなり、その違いは接着タンパク質による接着力に対する収縮タンパク質による皮質張力のバランスによって決まる力学モデル(1)と、接着力に対する膜弾性のバランスによって決まるモデル(2)の二つが議論されてきた。しかし、これらのパラメーターを系統的に変化させるのは実際の細胞を用いた実験系では難しく、これらのモデルを検証する研究は行われてこなかった。本研究では多細胞系の形態形成を理解する第一歩として、中性リン脂質からなる二個のベシクルを膜間相互作用を制御することで接着させたベシクルダブレットを用いて実験を行った。また、張力、弾性力、接着力の三つの寄与を考慮した一般的な力学モデルを考え、それをもとに数値計算を行い実験結果と比較することによってベシクルダブレットの形態生成の力学モデルの確立を目的とする。

【結果と考察】

ベシクルダブレットの実験では DMPC からなる GUV を用いた。このベシクル膜間には主に引力的なファンデルワールス力と斥力的な静電相互作用が働いているが、1 価の塩である KCl を加えることで静電斥力を遮蔽し接着力を制御した。さらに、ベシクルダブレットの温度を上げることにより、膜を熱膨張させ換算体積を制御し、その形態変化を観察した。これらの実験結果から接着力が弱い領域では接着面が平面になるが、強い領域では S 字になるという違いが見られ、表面張力が大きいダブレットは換算体積が小さい領域で全体として二つのベシクルが球のような形状を取ることが観察された。これらの結果は上述の接着力に対して張力、弾性力を考慮した一般的な力学モデルでよく表すことができ、実際に数値計算を行い実験結果と比較することによりベシクルダブレットの形態形成を表す定量的な力学モデルの確立に成功した。

【参考文献】

- (1) T Lecuit and P-F Lenne , Nat. Rev. Cell Bio. , 8 , 633 , (2007).
- (2) P. Zihlerl S. Svetina , PNAS, 104, 761 (2007).

液晶液滴の光学的運動制御

(中大院理) 土岸義治、酒井陽太、孫雲龍、片山建二

【はじめに】

化学反応や界面張力の濃度勾配などにより自発的に運動する物質をアクティブマターと呼び、この運動制御を目的とした研究が近年盛んになっている⁽¹⁾。その中で、液晶のもつ長距離分子間相互作用が利用される報告例も多い。近年、臨界ミセル濃度以上の界面活性剤溶液上にネマチック液晶を分散させると、液晶液滴が自発的に並進運動を行うことが報告されている⁽²⁾。運動メカニズムに関しては、界面活性剤分子が液晶表面に自発的な吸脱着を引き起こし、液晶界面で界面活性剤濃度の濃度勾配によるマランゴニ対流が発生し、並進運動を行うと理解されている。しかし、現在、アクティブマターの運動制御が課題となっている中、この液晶液滴のアクティブマターの運動制御を目的とした研究は報告されていない。そこで、本研究では、運動制御の方法として、強度や照射場所などを制御できる点で有用な光で液晶液滴の運動制御を行った⁽³⁾。

【結果と考察】

試料には光応答性部位を持つネマチック液晶(MBBA)をドデシル硫酸ナトリウム(SDS)水溶液(10wt%)中に分散させたものを用いた。液晶液滴はマイクロ流体デバイスを用いることでサイズ制御を可能にした(図1)。実験では光学顕微鏡を用いて、液晶液滴に紫外光(波長365 nm)を照射した際の運動を観察した。

右方向から紫外光を照射した結果、液晶液滴は光源に向かって運動を誘起した。紫外光照射を止めた際には、ランダムな運動を誘起し、再度、紫外光を照射した際、光源に向かって運動を誘起した(図2)。これは紫外光を照射した際にMBBAの液晶分子が光異性化し、それが界面活性剤分子の液晶への吸脱着を制御していると考えられる⁽³⁾。

本研究では、光を用いて液晶液滴の運動を制御することに成功した。発表では、照射位置、照射強度、界面活性剤濃度の依存性、運動機構についても議論する。

【参考文献】

- (1) S. Sanchez, et al., *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2015, **54**, 1414
- (2) S. Herminghaus, et al., *Soft matter*, 2014, 10, 7008-7022
- (3) Y. Dogishi, et al., *Soft Matter*, **2018**, 14, 8085-8089

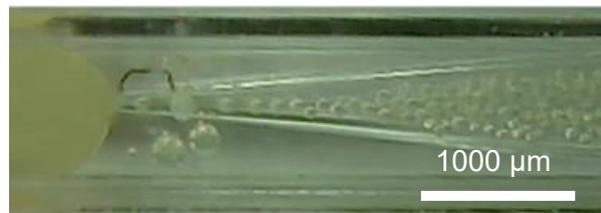


図1.液晶液滴生成の様子

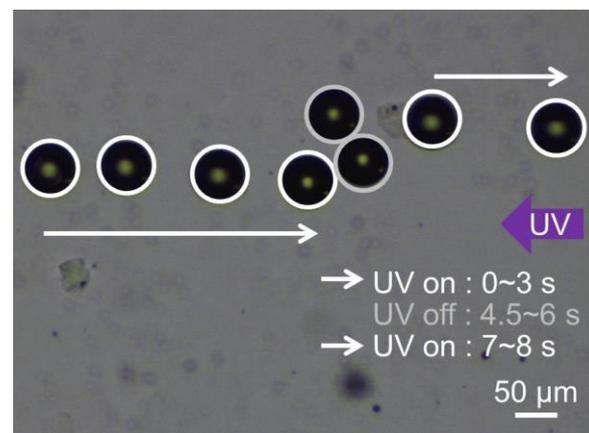


図2.紫外光照射中と照射停止中の液晶液滴の軌跡

光トラップ交流電気泳動測定法によるコロイド分散系の物性測定

(九大院理) ○壹岐晃平・木村康之

【はじめに】

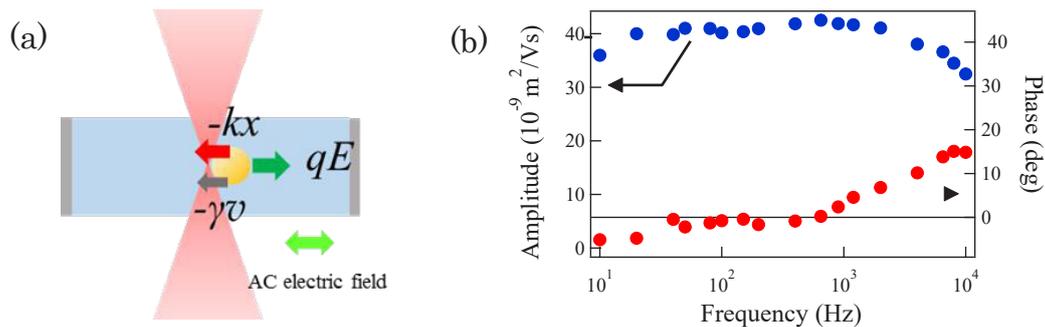
水溶液中のコロイド粒子は通常帯電しており、その表面電荷は分散系の安定性を決める上で重要である¹。従来、光散乱等を用いた直流電場下における電気泳動移動度の測定から表面電荷の評価が行われてきた。一方、電気泳動移動度の周波数依存性はコロイド粒子の表面電荷二重層での電荷ダイナミクスを反映することが期待されるが²、その測定例は限られている。本研究では、光ピンセットでコロイド粒子を捕捉し、交流電場に対する応答をレーザー回折法により測定することで、1 Hz～数十 kHzの広帯域で複素電気泳動移動度スペクトル測定を実現した。

【結果と考察】

トラップされた単一コロイド粒子の交流電場による変位測定は、回折光の位置を4分割フォトダイオードで高速・高精度で検出することにより行った(図 a)。この際、光トラップによる拘束力のために、得られた複素振幅から計算される見かけの移動度は低周波ではゼロとなる。そこで、この拘束力の効果を取り除くために、粒子の熱揺らぎの測定を用いて補正を行う方法を考案した。

図(b)には例として、水中に分散した直径1ミクロンのシリカ粒子の補正後の移動度スペクトルの強度と位相遅れを示す。1kHz以下の周波数域では移動度が周波数に依存しないこと、および高周波において緩和挙動を示すことが明らかとなった。

また、試料セルが帯電していることによる電気浸透流の影響を調べるために、セル面に対して粒子のトラップ位置を変えて移動度を測定したところ、周波数に応じて移動度の位置のプロファイルが異なることがわかった。実験系や測定方法、測定結果の詳細は当日報告する。



図(a):交流電気泳動スペクトル測定法で捕捉された粒子にかかる力。(b):水中に分散した直径1ミクロンのシリカ粒子の複素電気泳動移動度の周波数依存性。

【参考文献】

- (1)W.B. Russel, D.A. Saville and W.R. Schowalter, *Colloidal Dispersions* (Cambridge University Press, Cambridge, 1989). (2)H. Morgan and N.G. Green, *AC Electrokinetics: colloids and nanoparticles* (Research Studies Press Ltd., Baldock, 2003).

泡沫の緩和ダイナミクスの液体分率依存性

(首都大物理) 柳沢直也, 栗田玲

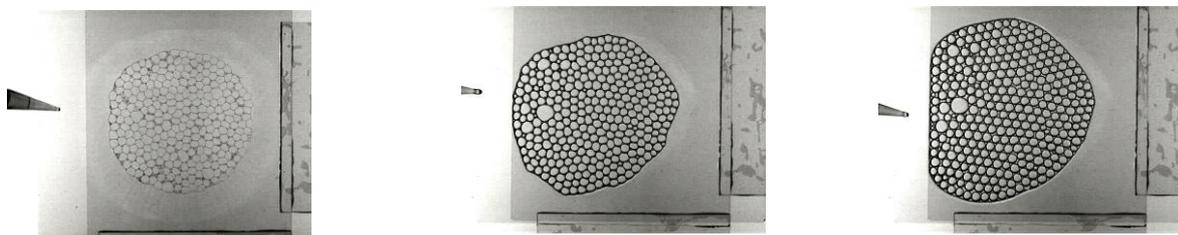
【はじめに】

泡沫 (foam) とは、液体中に気泡 (bubble) が混み合って内包されている状態である。2つの相の性質をもち合わせるため、機能性が高く、ビールの泡や洗剤など、日常生活の多くの場面で利用されている。泡沫を記述する重要なパラメーターの1つに液体分率 ϕ がある。泡沫は従来、 ϕ が低く内包された気泡の形状が多角形のときを dry、 ϕ が高く形状が円形のときの wet 状態と経験的に分類されてきた。最近の研究によって、泡沫の崩壊過程に注目し、 ϕ と泡沫の静的・動的挙動との関係性について調べたところ、気泡の形状が大きく変化する ϕ (dry-wet 転移点) があり、dry-wet 転移は気泡の再配置が変化する転移であることが明らかになった[1,2]。また ϕ が 1%以下という非常に dry な泡沫において、泡沫内の気泡が協同的に崩壊するという現象が報告され、そのメカニズムも明らかになっている[3]。このように泡沫は液体分率の違いによって多様な性質を示す。

泡沫の液体分率が増加すると、安定な状態になろうと泡沫内の気泡が運動を起こし始める。本研究において、微小摂動による泡沫内の気泡の運動を調べ、その液体分率依存性について研究を行った。

【結果と考察】

純水に家庭用洗剤を混ぜて溶液を作製し、ガラスノズルを通して空気を送り込んで泡沫を作製した。その泡沫を、厚みを持ったセルに移し、擬2次元泡沫を作製した。溶液を少量泡沫に注入すると、液体分率が増加し、泡沫内の気泡は再配置(T1 event)を起こして安定な状態になろうと緩和する。高速度カメラを用いて、この緩和過程の撮影を行った。その結果、dry から wet 状態に近づくにつれて再配置を起こす気泡の数が増えていくことが分かった。さらに、bubbly 状態(ジャミング転移点)に近づくにつれて、気泡が集団的(協同的)な運動をすることがわかった。



上図：液体分率が異なる泡沫の状態画像(左ほど ϕ が低く、右ほど ϕ が高い。)

【参考文献】

- (1) Y. Furuta, N. Oikawa and R. Kurita, Scientific Reports 6, 37506 (2016)
- (2) R. Kurita, Y. Furuta, N. Yanagisawa and N. Oikawa, Phys. Rev. E. 95, 062613 (2017)
- (3) N. Yanagisawa and R. Kurita, Submitted

Anomalous diffusion and fluctuation of a microdroplet of actomyosin

(¹Dept. of Phys., Kyoto Univ., ²RIES, Hokkaido Univ.)

Masahiro Makuta¹, Yukinori Nishigami² and Masatoshi Ichikawa¹

【Introduction】

Living cells actively regulate the generation of force during various biological processes. Cytoskeletons and its associated proteins mainly perform such force generations. Actin filament is one of the cytoskeletons, which plays a major role in force generation of living cells. For example, muscle actin generates contraction force in cooperation with the motor protein myosin. Actomyosin, which is a composite material of actin and myosin also works in deformation and maintenance of the cell shapes. We have performed *in vitro* experiments by using artificial cells to clarify the primitive mechanism of the deformation induced by actomyosin [1,2]. These works figured out the dynamic interface deformation and analyzed their statistical features, however, it has not yet examined internal dynamics inside the artificial cells correlated with the interfacial deformations. We here studied active fluctuation induced by actomyosin through the motion of probe beads encapsulated in the actomyosin droplet [3].

【Results and Discussion】

The basic behaviors of the interface were consistent with the results of previous studies, i.e., induction, nonperiodic oscillation, and wrinkling phases were emerged in order. Through the experiments, fluctuation of microbeads accompanied with motion transition of the interface exhibited correlations as shown in Figs. 1. (a) and (b). In induction phase (0 - 300 s), microbeads fluctuated around the initial position, and the motion became larger in the nonperiodic oscillation phase (400 - 500 s). In the early wrinkling phase (600 - 700 s), the microbead was fallen into the interface where the actomyosin cortex formed. In the former phases, anisotropic fluctuation was observed, e.g., diffusion coefficient in the tangential direction was different from radial direction. The result suggests anisotropic formation of actomyosin bundles and their force network due to the small spherical boundary condition.

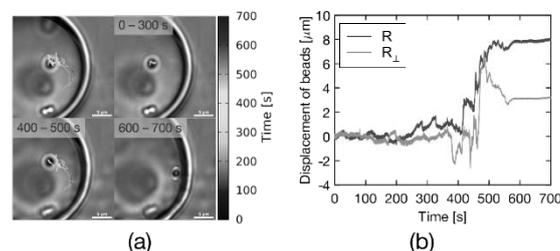


Fig. 1. (a)Trajectory of microsphere in actomyosin droplet.
(b)Displacement of microsphere from initial position.

【参考文献】

- (1) H. Ito, Y. Nishigami, S. Sonobe, M. Ichikawa, Phys. Rev. E 92, 062711 (2015).
- (2) Y. Nishigami, H. Ito, S. Sonobe, M. Ichikawa, Sci. Rep. 6, 18964 (2016).
- (3) H. Ito, M. Makuta, Y. Nishigami, M. Ichikawa, J. Phys. Soc. Jpn 86 (2017).

Swimmer-microrheology

¹ Department of Chemistry, Tokyo Metropolitan University,

² Research Institute for Interdisciplinary Science, Okayama University

Kento Yasuda¹, Ryuichi Okamoto² and Shigeyuki Komura¹

【Introduction】

In this work, we propose a new type of active microrheology using a microswimmer [1]. Microswimmers are tiny machines that swim in a fluid such as sperm cells or motile bacteria and are expected to be applied to microfluidics and microsystems. As one of the simplest microswimmers, we consider the Najafi-Golestanian three-sphere swimmer model [2], where three in-line spheres are linked by two arms of varying length. We investigate its motion in a general viscoelastic medium, and obtain a relation that connects the swimming velocity and the frequency-dependent complex shear viscosity of the surrounding viscoelastic medium (see Fig.1).

【Results and Discussion】

We show explicitly that the absence of the time-reversal symmetry of the swimmer motion leads to the real part of the viscosity, whereas the absence of the structural symmetry of the swimmer is reflected in the imaginary part of the viscosity. Hence, we shall call the proposed method the "swimmer-microrheology".

Generalizing the above work, we discuss the locomotion of a three-sphere swimmer in a viscoelastic structured fluid characterized by typical length and time scales [3]. We derive a general expression to link the swimming velocity to the sphere mobilities. In this relationship, a viscous contribution exists when the time-reversal symmetry is broken, whereas an elastic contribution is present when the structural symmetry of the microswimmer is broken. As an example of a structured fluid, we consider a polymer gel, which is described by a "two-fluid" model. We demonstrate in detail that the competition between the swimmer size and the polymer mesh size gives rise to the rich dynamics of a swimmer.

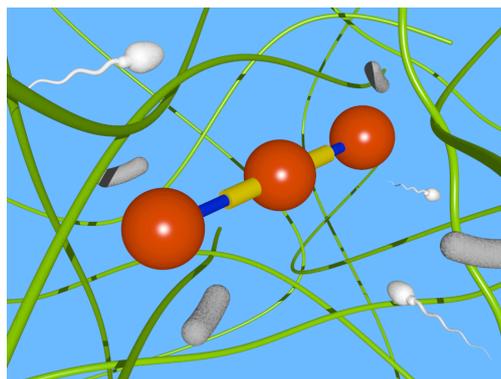


Fig. 1 : Najafi-Golestanian three-sphere swimmer model. The swimmer is embedded in a viscoelastic medium characterized by a frequency-dependent complex shear viscosity.

【References】

- [1] K. Yasuda, R. Okamoto, and S. Komura, *J. Phys. Soc. Jpn.* **86**, 043801 (2017).
- [2] A. Najafi and R. Golestanian, *Phys. Rev. E* **69**, 062901 (2004).
- [3] K. Yasuda, R. Okamoto, and S. Komura, *EPL* **123**, 34002 (2018).

ホログラフィック顕微鏡を用いたコロイド単粒子の交流易動度測定

(九大院理) 池田豊和, 木村康之

【はじめに】

コロイド粒子系のダイナミクスに関する情報を得るために、粒子位置の3次元追跡を行うことは有用である。しかし、代表的な3次元観察法である共焦点顕微鏡法や複数方向からの同時観察法は、時間分解能や、光学系の複雑さなど、個々に特有の問題点がある。本研究では、粒子像を単に撮影することで3次元追跡が実現可能であるという方法の簡便さの観点から、ホログラフィック顕微鏡を用いて交流電場下のコロイド粒子の運動を3次元追跡した。

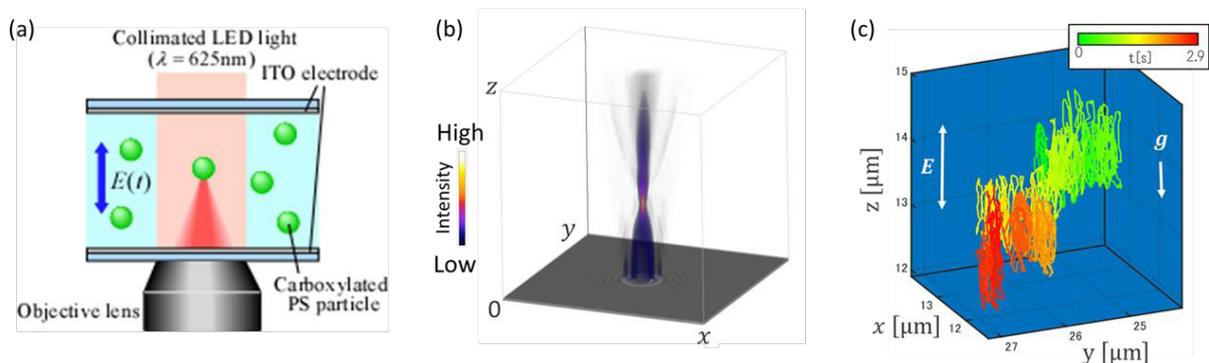
【実験】

ホログラフィック顕微鏡法は、粒子にコリメートしたレーザー光を照射して得られる散乱光と直接光の干渉像（以下、ホログラムと呼ぶ）を撮影し、それをもとに粒子の3次元位置を推定するものである。本研究では、レーザー光源に代えてコリメートしたLEDを光源として使い、Rayleigh-Sommerfeld back-propagation (RS法)によってホログラムから3次元光場を数値的に再構築し、これを用いてミクロンサイズ粒子の3次元位置の推定を行った。

図(a)に実験に用いた測定系の概略を示す。易動度測定への電気浸透流の影響を低減するために、電極をセルの厚さ方向に設置した。また、高周波数の交流電場による粒子の運動を追跡するために、高速度カメラを用いてホログラム撮影を行った。撮影したホログラムからRS法を用いて再構築された3次元光場を図(b)に示す。得られた光場の強度重心を粒子の重心位置と見なし、動画の各フレームについてRS法を適用することで粒子の3次元追跡を実現した(図(c))。

【結果と考察】

本研究では上記の手法を、水中で沈降しつつ電気泳動によりz方向に往復運動をする直径 $1.9\mu\text{m}$ のポリスチレン球状粒子に適用し、単一粒子の易動度測定を実現した。本測定より、今回測定した試料の易動度には10%程度の分布が見られ、また測定セル中の電気二重層による電圧降下に起因した易動度の周波数変化も観測された。



図(a)測定系の概略図。(b)得られたホログラムからRS法を用いて再構築された3次元光場。(c)正弦電場下でのポリスチレン球の3次元軌跡。

【参考文献】

- (1) F. C. Cheong, B. J. Krishnatreya, and D. G. Grier, *Opt. Express* **18**, 13563 (2010).
- (2) J. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (McGraw-Hill, New York, 2005).

液体系・粉体系におけるレイリーテイラー不安定性の共通性

(首都大物理) 小林 和也、栗田 玲

【はじめに】

重力下において高密度流体と低密度流体が界面を作り、密度反転状態にある場合、初期の小さな攪乱によって界面が凸凹が時間発展し、流体の入れ替わりが起こる。このような密度の異なる流体の界面不安定化現象はレイリーテイラー不安定性と呼ばれる。レイリーテイラー不安定性は日常的に発生する身近な現象だけに留まらず、超新星爆発、プラズマ核融合科学、地学的現象など様々な分野と関係し、これまでも様々な理論的・実験的研究行われている⁽¹⁾⁽²⁾。さらに近年、液体-液体系だけにとどまらず液体-粉体系や粉体-気体系などの実験的研究も行われている⁽³⁾⁽⁴⁾。しかしながら、液体系および粉体系における重力不安定化現象は、これまで個別的取り扱いがなされ、両者の共通性を議論する研究はこれまでにあまり行われていない。そこで我々は、粉体は応力鎖がネットワークを作り、パーコレートしていることに注目した。他のパーコレートしている系として、物理ゲルがあげられる。この物理ゲルを下から加熱することで徐々にパーコレートが解けていく。これは粉体の落下挙動に類似していると考え、物理ゲルと粉体における重力不安定性の実験的研究を行い、共通性を明らかにし、そのダイナミクスを解明することを目的にした⁽⁵⁾。

【結果と考察】

物理ゲルを用いた液体系レイリーテイラー不安定性および粉体系におけるレイリーテイラー不安定性の系統的实验をしたところ、Fig.1(a)(b)のように、物理ゲルであっても粉体系であっても似たようなダイナミクスを示すことが明らかになった⁽⁵⁾。さらに、不安定化フロントの移動や波長変化などにおいて、2つのダイナミクスが存在することを突き止め、その両者のダイナミクスの違いが実質的に流動可能な領域によって決まっていることを示唆する結果が得られた。この実質的流動可能領域は不安定化ダイナミクスを支配するパラメータであることを見出した⁽⁵⁾。

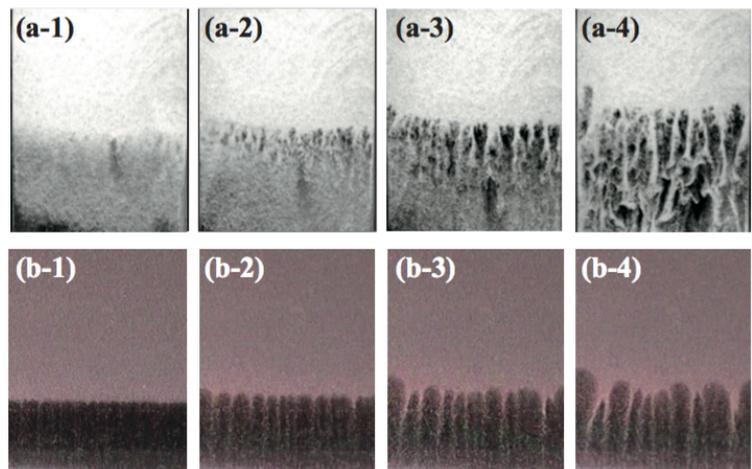


Fig. 1 : 粉体系(a)およびゼラチン (b)のレイリーテイラー不安定性⁵⁾

【参考文献】

- (1) D. H. Sharp, *Physica D* **12**, 3 (1984); Y. Zhou, *Phys. Rep.* **720-722** (2017).
- (2) K. U. Kobayashi and R. Kurita, submitted.
- (3) C. Voltz, W. Pesch, and I. Rehberg, *Phys. Rev.*, *E* **65**, 011404 (2001).
- (4) J. L. Vinningland, O. Johnsen, E. G. Flekkoy, R. Toussaint, and K. J. Maloy, *Phys. Rev., Lett.* **99**, 048001 (2007).
- (5) K. U. Kobayashi and R. Kurita, in preparation.

Motility-induced phase separation of self-propelled soft repulsive disks in the homeostatic state

¹Department of Chemistry, Tokyo Metropolitan University,

²Centre for Complexity Science, University of Warwick

Akifumi Yamashita¹, Matthew S. Turner² and Shigeyuki Komura¹

【Introduction】

Recently, collective behaviors of self-propelled particles have been studied widely. Fily and Marchetti showed that large number fluctuation and phase separation are generic properties out of equilibrium by a persistent local energy input, using the self-propelled disks interacting with each other via only repulsive force and being subject to rotational noise by simulation [1]. In this work, we consider the Marchetti's disk model [1] with property of cells, cell division and cell death by simulation. Moreover, we consider tissue steady state which is called homeostatic state. In this state, average number density is almost constant because cell division and cell death is balanced and the difference between division rate and death rate depends on local cell density and pressure [2].

【Result and Discussion】

In the small system size, we cannot observe some characteristic patterns and structures. However, we guess moving structures which is similar to traveling band structure in Vicsek-like model [3] can be observed in the big system size.

In the poster session, we show some results from the big system size simulation with some movies.

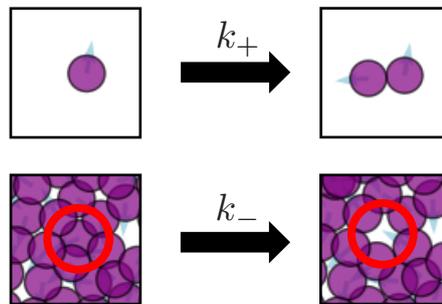


Fig.1: Snapshots of cell division and cell death. k_+ and k_- are division rate and death rate respectively. In the low density area, the number of cells easily increase. By contrast, in the high density area, the number of cells easily decrease.

【References】

- [1] Y. Fily and M. C. Marchetti, *Phys. Rev. L* **108**, 235702 (2012)
- [2] J. Ranft, M. Basan, J. Elgeti, J. F. Joanny, J. Prost and F. Jülicher, *PNAS* **101**, 1086107 (2010)
- [3] H. Chaté, F. Ginelli, G. Grégoire and F. Raynaud, *Phys. Rev. E* **77**, 046113 (2008)

Observation of nonequilibrium fluctuations below threshold voltages to Electroconvection in Chiral Nematic Liquid Crystals

(1:北大院工, 2: 九大院工, 3:大分大工) ○小林史明¹, 佐々木裕司¹, 日高芳樹², 長屋 智之³, 折原宏¹

【はじめに】負の誘電異方性と十分なイオン伝導性を有する液晶は、ある閾値以上の交流電圧下で液晶電気対流 (EHC) を引き起こす。この閾値電圧 V_c 未満においても液晶電気対流の前駆現象としての臨界ゆらぎが存在し、このゆらぎはシャドウグラフ法により観測されている。本研究においては、このシャドウグラフ法に対して、液晶にカイラリティをドーピングして系の鏡映対称性を破り、より簡便で液晶の研究において広く用いられている偏光顕微鏡を用いて、この不安定化するゆらぎの観測を行った。更に、ここではゆらぎの強度 A や緩和時間 τ の電圧依存性、並びにゆらぎと応答に関する解析結果を紹介する。

【サンプル・実験】サンプルには、メルク製の液晶 ZLI-2806 ($\Delta n = 0.044, \Delta\epsilon \sim -4.8$)を用い、イオンを1%, キラルドーパント(S-811)を0.27%添加した。この時のハーフピッチは $p \sim 7 \mu\text{m}$ 程度であった。また、セル厚は、らせんが生じないように、 $d = 6.7 \mu\text{m}$ に調整した。実験では、偏光顕微鏡下で撮影に高速白黒カメラを用いてフレーム数16384枚、サイズ $106 \times 106 \mu\text{m}^2$, 480 fpsの条件で撮影を行った。

【結果と考察】実際に、高速カメラを用いてゆらぎの画像を観察した画像を Fig. 1 に示す。Fig. 1 は $f = 120 \text{ Hz}, V = 21.05 \text{ V}$ で撮影した画像でストライプ状のゆらぎが発生している。得た画像の強度 $I(\mathbf{r}, t)$ に対して、Fourier 変換を行い、Fourier 係数 $J(\mathbf{k}, t)$ を計算した。この画像の Fourier 係数のパワースペクトル $P = |J^*(\mathbf{k}, t)J(\mathbf{k}, t)|^2$ を Fig. 2 に示す。Fig. 2 ではストライプ状のゆらぎに対応するピークが存在し、このスポットでの強度は閾値電圧に近づくと大きくなる。このスポットでの Fourier 係数の時間相関関数を Fig. 3 に示す。Fig. 3 を見ると、時間相関関数は減衰振動をしており、その振幅と緩和時間は電圧と共に大きくなって行くのが見て取れる。本研究では関数 $C_k(t) = Ae^{-t/\tau} \cos(2\pi ft)$ を用いて減衰振動を評価した。また、発表時にはゆらぎと応答についても解析結果を紹介する予定である。

【参考文献】

- (1) Xin-Liang Qiu and Guenter Ahlers, Phys. Rev. Lett. **94**, 087802 (2005).
- (2) M. Scherer, G. Ahler, F. Hörner, I. Rehberg, Phys. Rev. Lett. **85**, 3754 (2000)

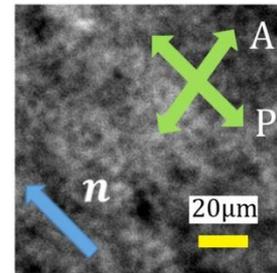


Fig. 1. ストライプ状のゆらぎの典型的画像。

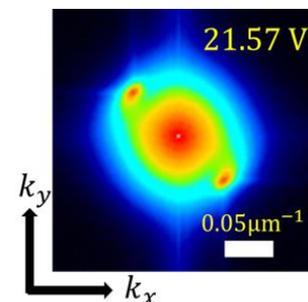


Fig. 2 Fig. 1 のパワースペクトル。

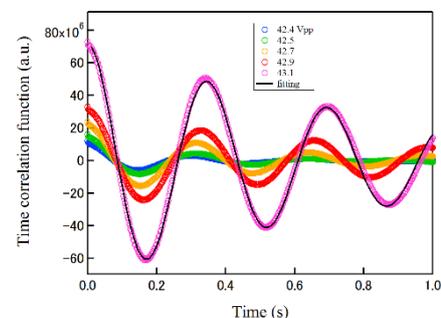


Fig. 3 時間相関関数 (at 120 Hz)

アクティブマターを用いたガラスの動的不均一性

(名古屋大学理学研究科物理系) 小野嘉己, 川崎猛史, 宮崎州正

【はじめに】

アクティブマターとは、自己駆動をする粒子から成る非平衡な系である[1]。アクティブマターは平衡な系では見られない特徴的な運動をすることに加えて、系を構成する粒子（アクティブな粒子）を高密度にすることで系がガラス的になることが近年の研究において報告されている[2]。従来のガラスの研究では、コロイド粒子などの熱平衡状態にある粒子（パッシブな粒子）を対象としたものが多く、アクティブな粒子を用いたガラスの研究は発展途上である。本研究の目的はアクティブな粒子から成るガラス（アクティブガラス）とパッシブな粒子から成るガラス（パッシブガラス）の類似点、相違点を明らかにすることである。ここでは特に、従来のパッシブガラスでよく研究されている動的不均一性に着目した。なぜなら、アクティブな粒子から成る多体系は集団運動をする事が知られており、アクティブガラスとパッシブガラスにおける動的不均一性の振る舞いに差が生じることが期待されるためである。

【結果と考察】

本研究では2次元系でアクティブガラスとパッシブガラスの数値実験による比較を行った。アクティブガラスに関しては Langevin 方程式, パッシブガラスに関しては Active Ornstein-Uhlenbeck Particles (AOUP)モデル[1]により粒子を駆動した。

動的不均一性を調べる手段として、4体相関関数と、Bond-Breakage 相関関数を用いて粒子運動を解析した[3,4]。4体相関関数は粒子の協同運動と配置換えを捉え、Bond-Breakage 相関関数は粒子の配置換えを捉えることに特化した関数である。これらの関数から得られる動的感受率のピークを調べることにより、動的不均一性の変化を捉える。

動的不均一性を調べた結果、Péclet数（アクティブネスの強度を表す指標）が大きいほど4体相関関数における動的感受率のピーク値 χ_4^{peak} は、パッシブガラスの値よりも大きくなることが明らかになった(図1)。一方で、Bond-Break 相関関数における動的感受率のピーク値 χ_B^{peak} はパッシブガラスの値と比べても大きな差が見て取れなかった(図2)。このことから、Péclet数の上昇にとともに粒子運動の協同性が強まることが明らかとなった。

【参考文献】

- (1) É. Fodor, M. Marchetti, *Physica A* **504**, 106 (2018).
- (2) R. Ni, *et al.*, *Nat. Comm.* **4**, 2704 (2013).
- (3) H. Shiba, *et al.*, *Phys. Rev. E* **86**, 041504 (2012).
- (4) H. Shiba, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 245701 (2016).

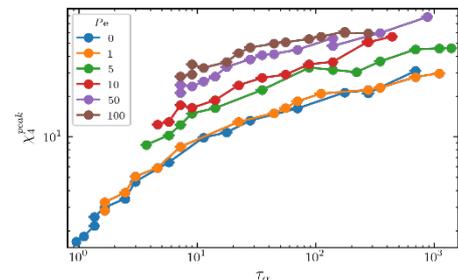


図1. 4体相関関数における動的感受率のピーク値.

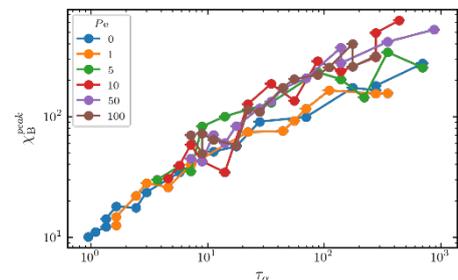


図2. Bond-Break 相関関数における動的感受率のピーク値.

図1, 2とも τ_α は中間散乱関数から得た構造緩和時間を表す。

ピン止めされた液滴の再結晶化のダイナミクス

(首都大物理) 森永 恒希, 栗田 玲

【はじめに】

雪のように同じ結晶形でもマクロなパターンが異なることは多く見られる。結晶のパターンは多くの物性(熱伝導, 電気的性質, 溶解)に関わっており学術的、工業的に重要であり多くの興味をもたれている分野である。バルク中での結晶のパターン形成は研究が進んでおり、よく理解されている。しかしながら基板上的液滴が蒸発し、再結晶化したときのパターン形成の研究は行われているがいまだ解明されていない。基板上での蒸発による再結晶化がバルクに比べて複雑である。基板上的液滴は蒸発の進行に伴い液滴径の大きさが縮んでしまう。液滴の蒸発速度は液滴径に比例する(1)ため蒸発速度が液滴径の変化に伴い変化する。

コロイド分散系の液滴を蒸発させた場合コロイド粒子が端に集まり液滴端をピン止めする(コーヒーリング効果)。これにより液滴端を固定し、蒸発中に液滴径が縮まなくなり蒸発速度が一定になった。本研究の目的はこの液滴を用いて基板上での蒸発による再結晶化の理解を進めることである。

【実験方法】

我々は重曹(NaHCO_3)溶液に液滴端を固定させるためのコロイド粒子として Latex 粒子 (直径 $0.052 \mu\text{m}$) を混合させカバーガラス上で蒸発させ再結晶化させた。

そして得られた結晶のパターンを顕微鏡で観察、撮影を行った。

【結果と考察】

液滴端が固定されていない液滴からはクラスターパターン (図 1a), 固定された液滴からは同心円パターンと樹枝状パターンが得られた (図 1b,c)。これら二つのパターンの析出は蒸発速度と液滴の初期濃度に依存しており、蒸発速度が速く液滴の初期濃度が低い場合は同心円、蒸発速度が遅く液滴の初期濃度が高い場合は樹枝状パターンが析出する。

さらに過飽和度を計算した結果、液滴内のローカルな過飽和度によってパターンが変化することが示唆された。(2)

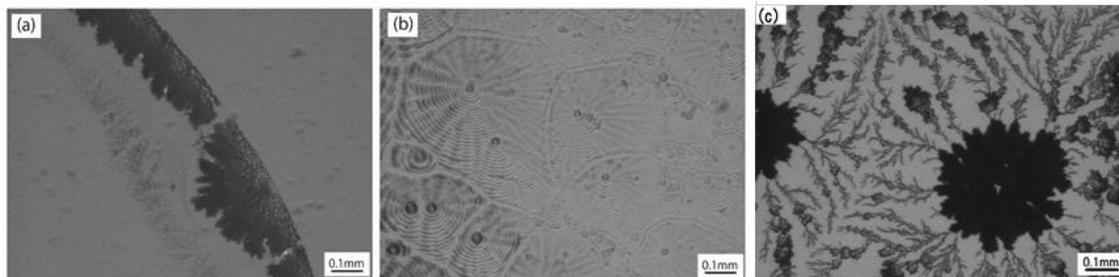


図 1 (a)液滴端が固定されていない場合(b)(c)液滴端が固定されている場合

(a)の場合、結晶は液滴の端にのみ析出する一方(b)(c)は液滴全体に結晶が析出する

【参考文献】

(1) R. D. Deegan, O. Bakajin, T. F. Dupont, G. Huber, S. R. Nagel, and T. A. Witten, Phys. Rev. E 62, 756(2000)

(2) K. Morinaga, N. Oikawa & R. Kurita, Scientific Reports 8, 12503 (2018)

Radial quenching を用いた 3 次元相分離パターンの制御

(首都大物理) 塚田 剛, 栗田 玲

【はじめに】

2 つの成分が混合した系における相分離は、混合比に応じてパターンを形成することが知られている。材料科学においてマクロな物性はパターンに大きく関係しているため、パターンの制御は重要な課題である。これまでの相分離の研究では、温度を空間一様に冷却し、パターン形成を調べるのが一般的だったが、最近我々は、点から徐々に冷却領域を広げていく方法を考えた(radial quenching)。2次元数値シミュレーションにおいて、点から徐々に冷却領域を広げていき相分離を引き起こすと、冷却領域を広げる速度 V_{xy} によって、同心円パターンや樹枝状パターンを形成することがわかった[1]。

実際の実験を意識した場合、3次元的に温度制御することは難しく、底面のような2次元面の温度コントロールが一般的である。そこで、我々は、3次元系において、底面だけを温度制御した時に形成される3次元相分離パターンに着目した。

【シミュレーション】

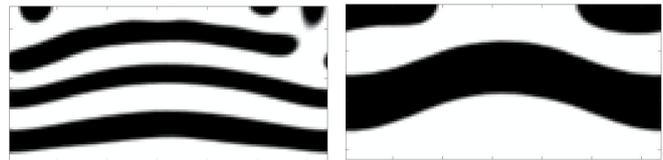
3次元系において下面の中心から徐々に冷却領域を広げるシミュレーションを行った。下面のみ相分離領域の制御を行い、それ以外の場所では温度拡散方程式にしたがって温度が伝搬していく。また、側面のみ周期境界条件を適応した。Jaiswal らが用いた温度が不均一な場合の相分離の動力学を記述する変更された Cahn-Hilliard 方程式、

$$\frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) = \vec{\nabla} \cdot \left\{ \vec{\nabla} \left[- \left(\frac{T_c - T(\vec{r})}{T_c - T_0} \right) \psi + \psi^3 - \nabla^2 \psi + \frac{J}{K} \frac{1}{T} \vec{\nabla} T \cdot \vec{\nabla} \psi - \frac{J}{4K} \psi \left(-\frac{1}{T} \nabla^2 T + \frac{2}{T^2} (\vec{\nabla} T)^2 \right) \right] + \vec{\theta}(\vec{r}, t) \right\}$$

を用いた[2]。簡単のため、流体力学的相互作用は入っていない。

【結果と考察】

下面の冷却領域を広げる速度 V_{xy} 変化させてシミュレーションを行うと、ある V_{xy} から遅い領域では、下面に平行な層状パターンを形成することがわかった。また層の厚み ξ と V_{xy} の間には、 $\xi \propto V_{xy}^{-0.45}$ という比例関係があることがわかった。さらにこの比例関係は初期においての系の z 方向からの多数相の流量 j を考える事により、簡単に説明できることがわかった。[3]



図：xz面の相分離の様子。

左の図に比べて、右の図は V_{xy} が遅い。

【参考文献】

- [1] R. Kurita, *Sci. Rep.* 7, 6912 (2017)
- [2] P.K. Jaiswal, S. Puri, K. Binder. *Eur. Phys. Lett.* 103, 66003 (2013)
- [3] T. Tsukada, and R. Kurita, submitted

化学刺激によるベシクルの形態制御

(東北大院理) 豊田 真之, 佐久間 由香, 今井 正幸

【はじめに】

生体膜は生命現象において様々な形態変化を起こす。例えば、エンドサイトーシスにおける細胞内外での物質のやり取りの際には、膜の突出や陥入、膜接着や融合といった膜変形が起こる。これらの変形は主にタンパク質の働きによるものであり、タンパク質がその形状を使って脂質膜の曲率を変えたり(図 1a)、細胞膜の裏打ちタンパクが収縮して脂質膜の張力を上げることで膜変形を実現している(図 1b)と言われている(1,2)。本研究では、このような生命機能に伴う膜変形を化学刺激によって膜の曲率や張力を制御することで再現し、膜の曲率や張力といった物理パラメータの変化が膜変形に及ぼす影響を検証することを目的とする。アニオン性脂質を含むベシクルに化学刺激を与えることで脂質を化学修飾し、局所的な膜の曲率を変化させる(図 1c)。また、化学刺激として与えるカチオンによってベシクルのアニオン性脂質を静電遮蔽することで膜張力を制御する(図 1d)。

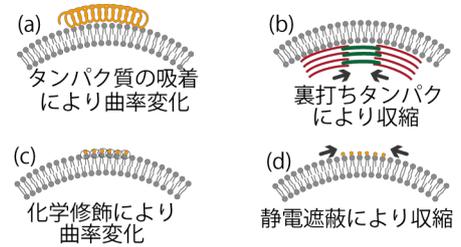


図 1 タンパク質による(a)曲率と(b)膜張力の制御及び化学刺激による(c)曲率と(d)膜張力の制御の模式図

【結果と考察】

中性脂質 DOPC とアニオン性脂質(DOPG, DOPS)からなる二成分ベシクルを白金電極上にエレクトロフォーメーション法により作製し、マイクロピペットを用いて様々な電解質をインジェクションした時のベシクルの応答を位相差顕微鏡で観察した。1, 2 価のイオンに対してはベシクルがピペットの方に伸びていく膜の突出現象が観察された。一方、3 価のイオンに対してはアニオン性のベシクルはそのイオン濃度が低い時はベシクルの接着、濃度が高い時は融合が観察された(図 2 参照)。これは、与えるイオンの価数により膜の曲率や膜張力を制御出来る可能性を示している。これらの化学刺激がもたらす膜変形の物理的な機構については現在検討中である。

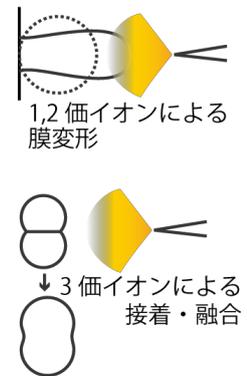


図 2 化学刺激による膜の応答 1,2 価は変形, 3 価は接着・融合

【参考文献】

- (1) J. Zimmerberg and M. Kozlov, Nat. Rev. Mol. Cell Biol., 7, 9-19 (2006)
- (2) T. Lecuit and P.-F. Lenne, Nat. Rev. Mol. Cell Biol., 8, 633-644 (2007)

コロイド分散系における Nernst 効果の理論的解析

(名古屋大学理学研究科) 氏名 松山洋道、宮崎州正

【はじめに】

Nernst 効果とは、磁場と温度勾配を互いに垂直にかけるとその両方に垂直な方向へ、電場が生じる現象である。しかし、古典非平衡定常状態では系を構成する粒子の平均速度が 0 になるため、Nernst 効果は現れないことが知られている。この結論は局所平衡を仮定した現象論的解析から導かれる。しかし、局所平衡の仮定が成立しない古典非平衡系においては Nernst 効果が生じる可能性は否定できない。実際、一種の Nernst 効果が古典非線形振動子系において発見された[1]。これは非平衡揺らぎに起因する現象であると考えられる。

【結果と考察】

我々は、古典系における Nernst 効果の普遍性及びその性質を調べるために、定磁場をかけた温度勾配下の相互作用の無い自由なコロイド分散系を用いた計算機シミュレーション及び理論解析を行った。コロイド分散系において局所平衡の仮定が成立しない領域は、粒子の速度緩和が遅い Underdamped 領域である。今回我々はこの領域を重点的に解析した。

我々は計算機シミュレーションの結果、相互作用のないコロイド分散系においても Nernst 効果が現れることを発見した。また、この系に対して速度緩和の時間スケールを摂動パラメータとして用い展開する断熱近似の方法[2]を拡張し適用することで、Underdamped 領域において Nernst 効果が現れることを理論的に示した。理論的な解析結果から Nernst 効果によって生じる密度流は温度場の 3 階微分に比例するという非自明な結果を得た。この理論的な結果はシミュレーション結果と定性的に一致している。また、我々の理論的な解析結果から Nernst 効果によって密度流が生じる原因は、Overdamped の場合の解として成立する温度場と密度場の積が一定値をとるという関係[3]が、Underdamped 領域では崩れることが原因であると考察される。今回は以上のコロイド分散系における Nernst 効果について発表を行う。

【参考文献】

- [1] S. Tamaki and K. Saito, arXiv (2018)
- [2] K. Kaneko, Prog. Theor. Phys. 66 (1981) 129-142
- [3] M. Widder and U. Titulaer, Physica A 154 (1989) 452-466

Theoretical study of destruction in biological tissues

¹ Department of Chemistry, Tokyo Metropolitan University

² Department of Physics, National Central University

Furuya Tomohiro¹, Hsuan-Yi Chen², and Shigeyuki Komura¹

【Introduction】

Recently, “cell transplantation” shows a growing interest in the clinical field in the context of organ transplantation. It is possible that the cell fragment is transplanted into patient. The advantage of this new method is that the cell transplantation prevents patients from serious surgical damage since the cells can be transplanted only through the catheter. Cell transplantation is being expected very much. But it remains unclear how cell tissues become fragment and about physical interpretation of that mechanism. We study about why the damage occurs in the cell tissue and how the damage progress. We regard cell tissues as viscoelastic model and there are many ways to express cell tissues as viscoelastic model [2]. We pursue viscoelastic model that can express the feature of cell tissue unerringly and investigate behaviors of the model with some forces. It should be critical for the accurate surgery to understand how the destruction (main crack) develops into the tissue once it occurs. We set the lattice model for the cell tissue and our main aim is solving this problem analytically.

【Results and discussion】

We regard the lattice model as viscoelastic sheets. A crack is set in the model in advance. This lattice model is stretched to fixed strain ε from top and bottom. We set equations of motion for each lattice point. We solve the equations of motion to obtain the relation between velocity of crack propagation and fixed strain ε .

【References】

[1] N. Sakumichi and K. Okumura, *Sci. Rep.* 7,8065 (2017).

[2] S. Tlili, C. Gay, F. Graner, P. Marcq, F. Molino, and P. Saramito, *Eur. Phys. J. E* 38,33 (2015).

Rheo-SAXS と Rheo-SALS によるラメラ/オニオン中間構造の推定

(¹ 首都大院理工・² 首都大院理・³ 大菜技研) 鈴木健斗¹
川端庸平²・菜嶋健司³・大野宏策³・加藤直²

【はじめに】界面活性剤ラメラ相が、ずり流動場により多重膜ベシクルのみで充填された「オニオン相」に転移する現象は、25年以上前に発見されているが、転移機構は未だに確立されていない。我々は、非イオン界面活性剤 C₁₄E₅/水系 (50 wt%, 55 °C) において、ずり速度を段階的に上昇させてレオロジー/X線小角散乱同時測定 (rheo-SAXS) とレオロジー/小角光散乱同時測定 (rheo-SALS) を行い、ラメラとオニオンの中間のずり速度領域 (0.05~3 s⁻¹) において、shear thickening 領域が二箇所 (I, II とする) あり、その間に shear thinning 領域が存在すること、SAXS と SALS の散乱パターンも対応して変化することを報告した¹⁾。今回は、rheo-SAXS と rheo-SALS を同一のセルを用いて測定し、I と II の間で定常的に存在すると考えられる中間構造の推定を行った。

【結果と考察】

図 1 (a)~(d) に測定結果を示す。(d) から、I と II の間では回折強度の関係が $\text{gradient} \approx \text{neutral} \gg \text{flow}$ となることがわかる。これは棒状の多重膜ベシクルが、定常状態として存在することを示唆している。(a) の方位角プロットを 2 つの Lorenz 関数の重ね合わせとみなしてピークの積分強度とベースラインを求め、これらより棒の軸比を求めた。結果を図 1 (e) に示す。軸比はずり速度上昇と共に減少して 1 (オニオン相) に移行することがわかる。rheo-SALS の二次元パターンから求めたオニオンの直径は、他の系でも見られるように、ずり速度の約 $-1/2$ 乗に比例して減少した (図 1 (e))。今回の結果は、中間構造と考えられる棒状ベシクルにおいても、ずり速度上昇に伴う長さの減少が起こることを示唆している。

【参考文献】

- (1) 鈴木健斗ら, 第 68 回コロイド及び界面化学討論会 (2017. 9, 筑波).
- (2) T.Kato, *Advances in Biomembranes and Lipid Self-Assembly*, **27**, 187 (2018).

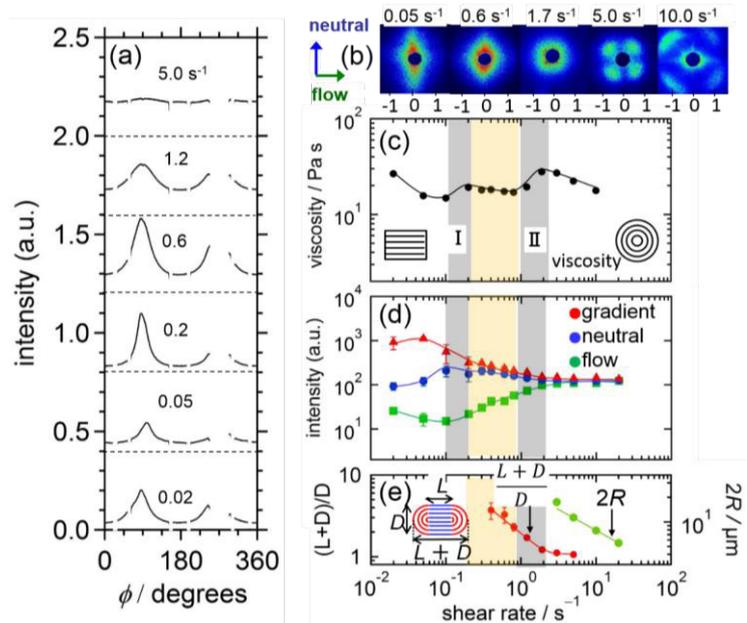


Fig.1. Shear rate dependence of azimuthal plots of SAXS diffraction peak (a), 2-D SALS pattern (b), viscosity (c), diffraction peak intensities for three principal directions (d), and axial ratio of rodlike vesicles and diameter of onions (e) for C₁₄E₅/water system (50 wt%, 55°C).

Slippery 界面のデザインと回転磁場を用いた定量的評価

(京大院理¹, DIC², JST-CREST³)

高本幸希^{1,3}、高西陽一^{1,3}、荒木武昭^{1,3}、山本 潤^{1,3}、西山伊佐^{2,3}

【はじめに】

液晶・ガラス界面において液晶分子の配向を固定するための界面アンカリング力は、今日の液晶表示機器の原理に欠かせないものであるが、一方で駆動電圧を上昇させる原因でもある。山下らは、液晶への不純物ドーピングによって『液体ぬれ界面』を形成し、アンカリング力のないゼロアンカリング界面を実現したが、この方法で得られた界面は、1°C程度の狭い温度範囲でしか有効でなかった^[1]。本研究では、ガラス基板上で PEG を側鎖に持つ単官能および 2 官能のアクリレートモノマーを重合して「高分子ゲル状態」を形成させることで、広い温度範囲で界面アンカリング力を弱めることに成功した。界面の定量的な評価に当たっては、Oswald の回転磁場法を用いた^[2]。

【結果と考察】

1. 実験の概要 ガラス基板表面に PEG-methyl ether acrylate と PEG-diacrylate の混合物を塗布し、UV 照射によって架橋重合させる。これを 2 枚貼り合わせて作成したセルにネマチック液晶を注入し、図 1 に示すセルと装置を用いて、回転磁場下での透過光強度 $I(\theta)$ の変化を測定し、Oswald の理論による解析を行う。

2. 実験および解析結果 図 2 に測定結果および実験結果と解析を示す。測定温度はいずれも 52.6°C で、液晶サンプルには E44 相当品 (株式会社 LCC) を用いた。フィッティングに当たっては、Oswald の理論から得られる次の self-consistent な式を用いた^[2]。

$$\phi_S = \omega t - \Phi - \left(\frac{r}{2}\right) \sin(2\phi_S)$$

ここで ω は磁場の角速度、 t は時刻である。上式で表される ϕ_S を用い、直交ニコル下で観測される I の変化、 $I = \sin^2(2\phi_S)$ による実験結果のフィッティングを行った。位相角 Φ は界面の粘性に由来する、磁場方向からの一定の位相遅れの大きさを表す。また r は ϕ_S と磁場方向のなす角に依存した回転の周期的な加減速の大きさを表し、界面の弾性 (アンカリング) に由来する。本研究では、 Φ および r と、実際の物理量との関係を用いて、界面を起源の異なる弾性と粘性の両面から定量的に評価することに成功した。

【参考文献】

- [1] 山下真澄: 不純物 disorder 効果による表面局所融解と Slippery 界面. 修士論文 (2016)
 [2] P. Oswald: EPL 107.2 (2014): 26003.

【謝辞】 当研究は JST-CREST (グラント番号 JPMJCR1424) として援助を受けた成果です。

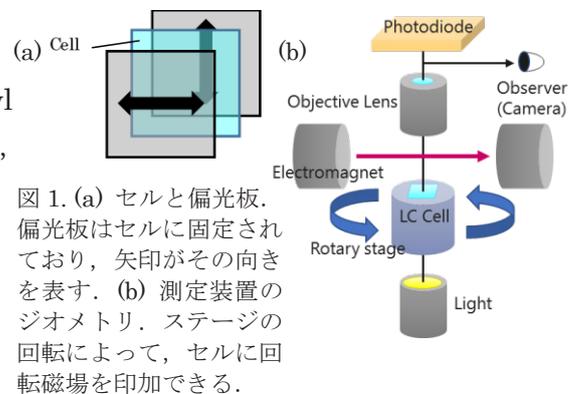


図 1. (a) セルと偏光板。偏光板はセルに固定されており、矢印がその向きを表す。(b) 測定装置のジオメトリ。ステージの回転によって、セルに回転磁場を印加できる。

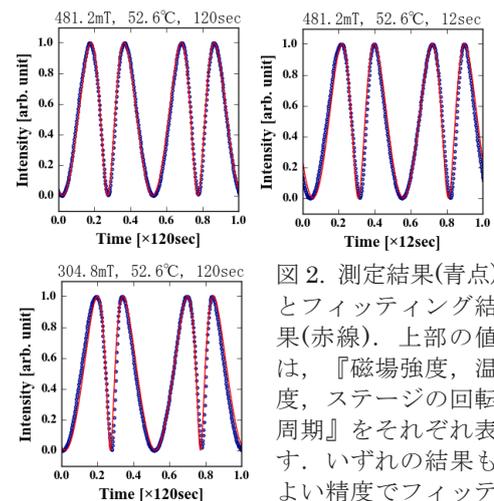


図 2. 測定結果 (青点) とフィッティング結果 (赤線)。上部の値は、『磁場強度、温度、ステージの回転周期』をそれぞれ表す。いずれの結果もよい精度でフィッティングできている。

周期剪断下の高密度分散系における降伏現象と粒子軌道の周波数依存性

名古屋大学理学研究科 今村桃太、川崎猛史、宮崎州正

●はじめに

外力に対する機械的応答の特性は物質の基本的な情報である。コロイド溶液中の粒子など、熱ゆらぎのない粒子系の密度を大きくしていくと、ある密度を境に jamming 転移が起こり、粒子間の接触によって剛性が生じる。さらに、このような系に大きな外力を加えると降伏現象 (yielding) が起こり、系の応答が弾性から塑性へと変化する [1]。降伏現象は剛性率などのマクロな量に見られるが、この現象をミクロなスケールで説明するものとして、粒子の運動の可逆性が注目されている。周期剪断下の高密度分散系では、剪断振幅 γ_0 の増加によって、全ての粒子が一周期後に元の位置に戻ってくる可逆状態から不可逆状態への不連続転移が起こる。これは吸収状態転移の一種であり、非平衡相転移の観点からも興味深い現象である。また、この可逆・不可逆転移の転移点 γ_c は降伏点 γ_y と非常に近い値を取る。つまり、この相転移は高密度分散系のレオロジーを理解する上でも重要な問題である [2]。

可逆・不可逆転移を扱った過去の研究は、周期剪断の周波数が小さい極限 (準静的極限) に注目したものがほとんどである。一方で、周期剪断下の剛性率については周波数依存性が報告されている [3]。しかし、周波数の降伏現象や粒子軌道への影響は明らかになっていない。このことを明らかにするのが本研究の目的である。

●結果と考察

我々は、分子動力学法を用いて Overdamped-Langevin 方程式に従う粒子の系に周期剪断を加えるシミュレーションを行い、様々な周波数で剛性率や粒子軌道の解析を行なった。その結果、先行研究 [2] における計算と比べて 2 桁大きい周波数まで同様の可逆・不可逆転移が起こり、 γ_c と γ_y は周波数と共に増加することを発見した。このことから、先行研究 [2] で主張された粒子軌道における不連続転移と降伏現象の対応は広い範囲の周波数で成り立つものだと言える。さらに、粒子軌道の形状についての解析から、周波数の増加に伴って粒子の運動がアフィン変形に近づき、それが γ_c の増加の原因となっていることが分かった。

●参考文献

- [1] D. Bonn *et al.*, Rev. Mod. Phys. **89**, 035005 (2017).
- [2] T. Kawasaki and L. Berthier, Phys. Rev. E **94**, 022615 (2016).
- [3] K. Baumgarten and B. P. Tighe, Soft Matter **13**, 8368 (2017).

疑二次元系における液中液滴の融合

(お茶の水女子大学物理) 古賀由希菜, 奥村剛

【はじめに】

制限された空間内での滴の挙動を理解することは、lab-on-a-chip の操作やインクジェットプリンタ技術など工学的な技術の発展において必須のものとなっている。このように制限された空間内で液滴に働く粘抗力を理解するために、近年ヘレシヨウセルと呼ばれる厚み方向が数 mm の水槽を用いた研究が盛んになっている。粘性液体中での液滴の融合[1,2]や、バブルの上昇[3,4]、破裂[5]などがその例である。

【結果と考察】

本研究ではヘレシヨウセル中での液滴の液槽への融合という現象を扱う。具体的には、上部に PDMS というシリコンオイルを、下部にグリセリンを満たしたヘレシヨウセル内にグリセリンの液滴を落下させ、その融合の瞬間を観察する。今回、セルの厚み D は $D=2$ mm と固定し、 η_{out} と η_{in} を $\eta_{out} > \eta_{in}$ の範囲で変化させて実験を行い、顕微鏡レンズと高速カメラを用いて融合の架橋部分(ネック)を撮影をした(図 1)。

今回は特に、 $\eta_{out} = 10,000$ cSt においてグリセリンの粘度 η_{in} を 9.3~344 cSt と変化させて実験を行い、融合の初期に着目した。ここで、融合初期というのは、ネックの半径 $r < \text{セルの厚み } D$ となっている範囲で、ネックが三次元的な形状をしている領域のことを言う。同様の粘度比($\eta_{out} > \eta_{in}$)で行われた三次元系での実験では、融合初期におけるネックの半径 r は $r \approx \gamma t / \eta_{in}$ の式に従って成長することがわかっている[6]が、本研究ではこの式に従わないという結果が得られた。これは、液滴を二次元空間に閉じ込めたことによる新しい現象と考えられる。発表では、さらに η_{in} と η_{out} を変化させた結果についてより詳細に言及する。また、先行研究から粘度比を逆転させたことにより、グリセリン液滴-セルの壁の間の PDMS の薄膜が破れるという現象が多くみられるようになった。これは、[4]を参考に、改善を図っている。

【参考文献】

- [1] A. Eri and K. Okumura, Phys. Rev. E Rapid Communication, 82, 030601 (2010)
- [2] M. Yokota and K. Okumura, J. Phys. Soc. Jpn. 81 (2012) SA015.
- [3] M. Yahashi, N. Kimoto and K. Okumura, Sci. Rep. 6, 31395 (2016)
- [4] L. Keiser, K. Jaafar, J. Bico and E. Reyssat, J. Fluid Mech, (2018)
- [5] M. Murano and K. Okumura, Phys. Rev. Fluids 3, 031601(R) (2018)
- [6] Paulsen J. D. , R. Carmigniani, A. Kannan, J. C. Burton, S. R. Nagel, Nat. Commun. (2014)

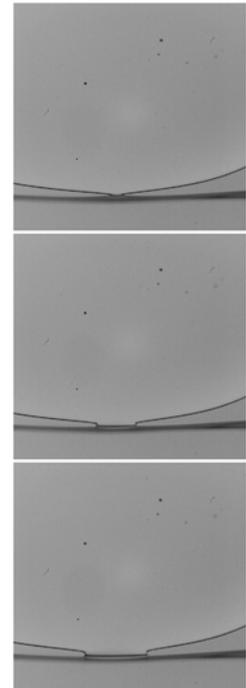


図 1：二次元液中液滴の融合
液滴・液槽間に形成されたネックが成長する様子。

同期効果を含む三つ玉マイクロスイマー

¹首都大学東京 理学研究科

²千葉大学 大学院理学研究院

¹江良 勝智, ²小谷野 由紀, ²北畑 裕之, ¹好村 滋行

【はじめに】

三つ玉スイマーの既存の研究として、2本のアームが伸縮振動する剛体棒のとき (Najafi-Golestanian のモデル) [1]と2本のアームがバネである弾性スイマー[2]などがあるが、これらのモデルにおけるスイマーの速度は、2本のアームの間の初期位相差に依存するということが分かっている。そこで、アームが同期するようなモデルではどのような挙動を示すかということを数値シミュレーションで調べた。ここでいう同期というのは、蔵本モデル[3]を参考にした時間発展方程式を導入することを意味している。

ここで考える三つ玉スイマーは1次元方向のみに動くことができ (ただし流体相互作用は3次元)、2本のアーム (バネ) の自然長を振動させることでアームが振動し (式1)、スイマーが運動する。また、アームの振動の間には同期が起こっている (式2)。

$$\ell_A = \ell + d \cos \theta_A, \ell_B = \ell + d \cos \theta_B \quad (1)$$

$$\dot{\theta}_A = \Omega + \alpha \sin(\phi_{12} - \theta_A), \dot{\theta}_B = \Omega + \alpha \sin(\phi_{23} - \theta_B) \quad (2)$$

$$\phi_{12} = \arctan \frac{\dot{x}_2 - \dot{x}_1}{x_2 - x_1 - \ell}, \phi_{23} = \arctan \frac{\dot{x}_3 - \dot{x}_2}{x_3 - x_2 - \ell} \quad (3)$$

式3は、それぞれのアームの自然長からのずれとアームの伸び縮みする速度の位相空間における角度を示している。

【結果】

同期の強度を一定にすると、スイマーが最終的に到達する速度は初期位相差によって一定値を取るか、ゼロとなるかのいずれかであった。また、この一定値は同期の強度の値によって決まるということもシミュレーションから分かった。

加えて、速度-初期位相差のグラフにおいて同期の強度が大きいと、近傍において速度が0となる場合があり、位相差を変化させていった際に0と一定値がどこで切り替わるかというのは、同期の強度に依存することも分かった。

【参考文献】

[1] A. Najafi and R. Golestanian, Phys. Rev. E 69, 062901 (2004).

[2] K. Yasuda, R. Okamoto, and S. Komura, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 043801 (2017).

[3] 蔵本由紀(2007)「いわゆる『蔵本モデル』について」, 『応用数理』17(2), p.175-177.

荷電脂質ベシクルの相分離と形態変化の粗視化動力学シミュレーション

(¹阪大工,²東大物性研,³JAIST) 伊藤 弘明¹, 樋口 祐次², 下川 直史³

【はじめに】

多種類の脂質分子で構成される脂質二分子膜は、脂質分子間の相互作用に由来して空間不均一な相分離ドメイン構造を自発的に形成する。このような構造形成は生体膜においても類似の構造が存在する可能性があり、ラフト構造と呼ばれ盛んに研究が行われている。現在までのほとんどの脂質二分子膜ベシクルの研究は中性脂質を用いたものである一方、荷電脂質分子を含む脂質二分子膜ベシクルのふるまひは、生体膜モデルや、長距離相互作用を含むソフトマターとして興味深い系である。本研究では、脂質二分子膜ベシクルの粗視化分子動力学シミュレーションを行い、脂質分子の親水基間に長距離静電相互作用を取り入れたベシクルの膜内相分離ダイナミクスと、相分離に付随して起こる形態変化を調べた(1)。

【結果と考察】

図1に中性脂質ベシクルおよび、荷電脂質ベシクルが一価塩濃度 $n_0 = 1 \text{ M}$ と $n_0 = 100 \text{ mM}$ の溶液中を想定した環境での相分離ダイナミクスを示す。中性脂質ベシクルでの相分離に比べ、荷電脂質ベシクルの相分離には相分離開始時間に遅れが現れることがわかった。それらベシクルについて典型的ドメインサイズの成長則を解析し、その静電相互作用の効果を定量化した。中性ベシクルでスピノーダル分解型の相分離が見られる条件において、一価塩濃度が 100 mM オーダーで一方の脂質を荷電脂質に置き換えたところ、静電斥力相互作用により相分離ダイナミクスが核成長型へと変化することが分かった。

荷電脂質ベシクルの場合、更に長時間の計算においてベシクルの球形形状が不安定であり、荷電脂質に富む相分離ドメイン内で細孔形成が起こり、最終的にディスク状、ひも状、バイセル状といったトポロジーの変化をともなう形態変化が引き起こされた。この形態変化について、脂質間の斥力を担う塩濃度と引力を担う疎水性相互作用パラメータに関して最終的な形態変化の相図を得た。静電相互作用に誘起される細孔形成の起源について、粗視化分子のスケールで可視化と考察を行ったところ、荷電脂質分子の膜内局所配向の乱れが細孔形成を誘起していることが示唆された。

【参考文献】

(1) H. Ito, Y. Higuchi, and N. Shimokawa, Phys. Rev. E 94, 042611 (2016).

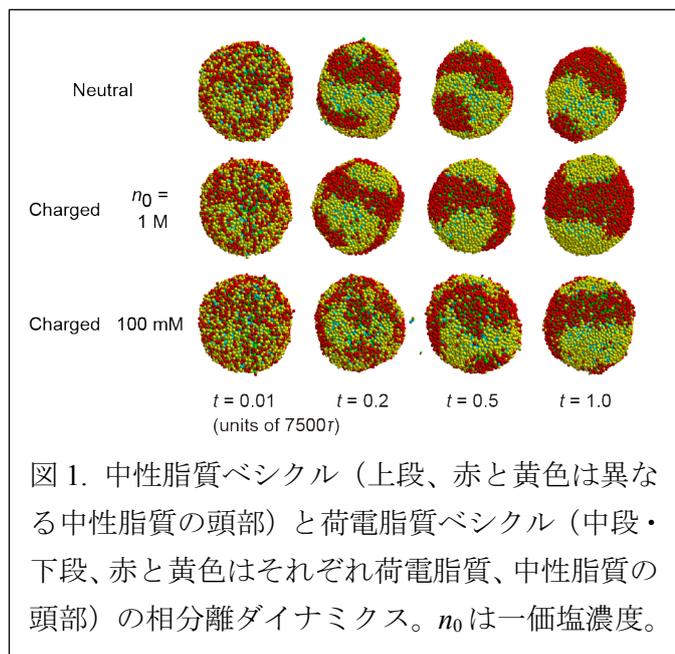


図1. 中性脂質ベシクル（上段、赤と黄色は異なる中性脂質の頭部）と荷電脂質ベシクル（中段・下段、赤と黄色はそれぞれ荷電脂質、中性脂質の頭部）の相分離ダイナミクス。 n_0 は一価塩濃度。

ゲル化と分解：樹状構造近似による理論解析

(東京大学大学院 工学系研究科) ○作道直幸、酒井崇匡

【はじめに】 高分子ゲルは、高分子鎖の集合を架橋して作られた網目状の構造を持つ物質が溶媒（例えば水）を含んだものである。本研究では、高分子ゲルの中でも、 m 分岐のモノマー A_m と n 分岐のモノマー B_n の二種類のモノマーの両末端間が縮合して作られるものを考える（図1）。このようなAB型重縮合によるゲル化は、インジェクタブル・ゲルの作成に使われるなど、ゲルの医療応用にとっても重要である。

高分子ゲルのマクロな物性の制御には、モノマーの末端における結合率 p を制御することが重要である。結合率 p を実験的に制御する簡便な方法の一つは、モノマー A_m とモノマー B_n の分子数の比率 $r = [A_m]/([A_m] + [B_n])$ を変えることである（ここで $0 \leq r \leq 1$ ）。特に、 r が0および1に近いときには、重合が完了した状態において少ない方の分子の末端はほぼ完全に反応する。そのため、 r の制御によって、重合が完了した状態の p が制御できる。

他方、 r が1/2に近い状況では、（ r は一定のまま） p の直接制御が可能である。 p は縮合反応の進行によって増加するため、例えば途中でpHを急激に変化すれば反応を停止できる。

以上では、結合率 p を制御する二通りの方法を紹介したが、より一般的に考えると、結合率 p と比率 r の二つのパラメータが独立に制御可能であることがわかる。本研究では、 p と r を独立に変化させたとき、ゾル・ゲル転移の臨界点および、マクロな物性に寄与する架橋点、部分鎖、サイクル（図2）の数密度を、樹状構造近似を用いて理論的に解析した。

【結果】 本研究では、一般の分岐数を持つモノマーの重縮合について樹状構造近似の元で計算を行った。

図3では、例として、四分岐のモノマー(A_4, B_4)で解析した結果を示す。グレーは、原理的に取り得ないパラメータ領域を示す。白の領域と色付きの領域は、それぞれゾルとゲルを示す。ゲル領域において、架橋点数、部分鎖数、サイクル数の等高線を描いた。ただし、取り得る最大値をそれぞれ1に規格化した。

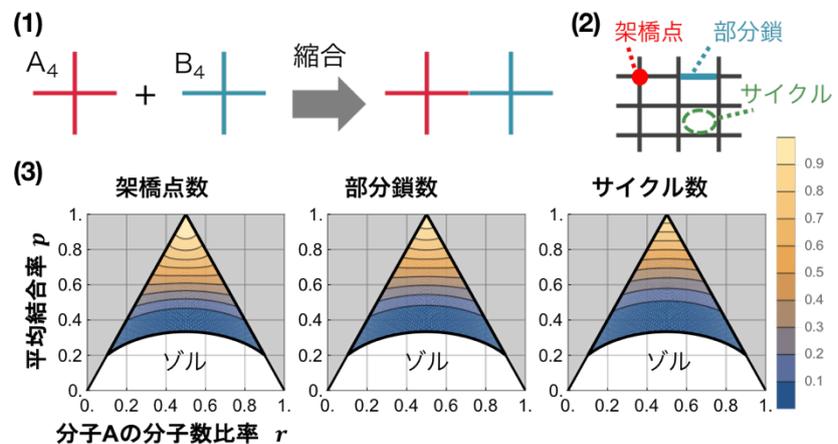


図3では、例として、四分岐のモノマー(A_4, B_4)で解析した結果を示す。グレーは、原理的に取り得ないパラメータ領域を示す。白の領域と色付きの領域は、それぞれゾルとゲルを示す。ゲル領域において、架橋点数、部分鎖数、サイクル数の等高線を描いた。ただし、取り得る最大値をそれぞれ1に規格化した。

【考察】 図3によれば、結合率 p が一定であっても、比率 r によって、架橋点数、部分鎖数、サイクル数が変化する。その傾向は、特にゾル・ゲル転移点（ゾルとゲルの境界）近傍で顕著である。しかし、ゲル化がかなり進行した p が大きい領域では、サイクル数は r にほぼ依存しない。このことは、弾性率などのサイクル数で決まる物理量は r に無関係で p のみで決まることを示唆している。なお、今回得た相図は、ゲル化だけでなく、ゲルの分解時に使用することも出来る。使用済みのゲルを分解することは、医療応用に重要な役割を果たす。

冷温下のシャジクモ仮根細胞内における小胞体の滑り運動

(茨城高専・国際創造工学科) 三橋 和彦、大津 卓人

【背景】

植物細胞内の原形質小胞体(Endoplasmic Reticulum: ER)は、細胞壁内側に沿って滑り運動することによって細胞内を攪拌する(原形質流動)。シャジクモの場合、流れが僅かに twist しながら細胞長軸に沿って細胞内を周回するため barber pole 型と呼ばれる。細胞生物学によれば、ER の駆動は、その膜に結合したミオシン分子が、細胞壁に配向したアクチン束上を滑走して引き起こされる。その際、個々の分子の駆動力は ER の持つ粘弾性と可塑性により伝搬されると推測される。さらにミオシンは、束状に偏在したアクチン上を確率的に結合・駆動・解離するため、ER 内に時間的・空間的に激しい応力の偏りを誘起する可能性がある。実際、駆動領域では不規則な原形質の運動が観測され、氷点近傍の冷温では顕著になることが明らかとなっている⁽¹⁾⁽²⁾。こうした確率論的な ER の駆動機構が明らかとなれば、モータータンパク質が ER を介し協同して細胞を「動かす」力学機構を一般化できる可能性がある。

【結果と考察】

本研究では、葉緑体がない「仮根」細胞を氷点近傍に冷却し、プローブ粒子に見立てた ER 中の顆粒の運動をビデオ録画(40-60fps)した。一方、通常の節間細胞は、葉緑体を一部の円状領域のみ脱落させる窓開け処理を施し、同様に冷温下で観測し仮根と比較した。

図 1 に仮根の細胞壁付近の断面を暗視野観察した画像(背景減算及びコントラスト増強処理

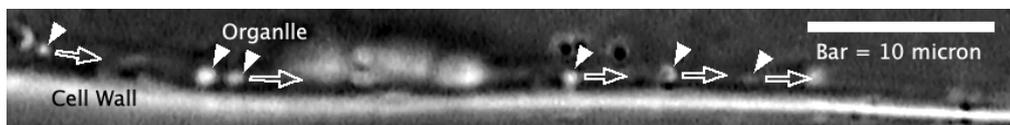


図 1 アクチン束に沿って滑り運動する原形質顆粒

を示す。葉緑体がないため照明光の散乱が大幅に低減された像が得られた。多くの仮根細胞を観察した結果、以下の事実が明らかとなった。発表ではこれらの原因を論じる。

- (1) 仮根の成長に伴い ER の体積は低下し、数週間程度でほとんど消失する細胞が多かった。同時に原形質顆粒の粒径も減少した。
- (2) ER の厚みが大きい仮根細胞内では、流速が比較的大きく流動も安定していた。一方、ER が薄い試料では、滑り運動が抑制される傾向があった。本原因は不明だが、ER の厚みか大きさにミオシンの結合頻度や応力の伝搬効率が依存する可能性がある。
- (3) 節間細胞を急冷した時、流動に大きな乱れが生ずる⁽¹⁾が、厚みのある領域は比較的滑らかに滑走し続けた一方、ER が乏しい領域では速度低下や逆走等不規則運動が頻見された。

【参考文献】

- (1) 三橋, 稲光, 中川, 森, 氷点付近における車軸藻原形質の滑り運動の速度分布, 第 4 回ソフトマター研究会 要旨集 (2015).
- (2) 三橋, 大津, 氷点近傍におけるフラスコモ仮根細胞内の原形質顆粒の運動, 日本植物学会 第 82 回大会研究発表記録 (2018).

An enhancement effect of the liquid-crystalline order observed in azobenzene-containing copolymer liquid crystal mixture

(¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²JST-CREST)

Chiao-Ying Chien,^{1,2} and Jun Yamamoto^{1,2}

【Introduction】

The photo-responsive LC material based on the isomerization of azobenzene have received more interest in recent years. Samitsu et al. proposed a prototype of the molecular manipulator which transported nanoscale impurities by spatial variation of order parameter (S) in the azobenzene-doped nematic liquid crystal[1]. Under a UV illumination, the linear trans-azobenzene converted into cis-azobenzene. The presence of the bent-shaped cis-isomer disturbed the liquid-crystalline order and caused a decrease of S . As a result, the impurities transported and accumulated to the illuminated area through the spatial variation of S . In order to improve the resolution of this molecular manipulator, the azobenzene in the nematic liquid crystal was copolymerized with RM257 in our previous study[2]. However, we noticed an unusual photo-induced phenomenon in this polymerized LC mixture. The birefringence increased gradually and then went reversely to lower than the initial state during a UV illumination. In this report, we studied this enhancement effect and attempted to understand the mechanism of this phenomenon.

【Results & Discussion】

Since the enhancement of birefringence can be quickly erased by the blue light (cis→trans), it suggested that the cis-azobenzene molecules also play important roles in this enhancement effect. On the other hand, we investigated the photo-induced behavior in different composition of the copolymer dispersed in nematic liquid crystal. The results indicated that this phenomenon greatly depended on the ratio of the monomers, which controls the structure of copolymer formed in the nematic phase. We observed the morphology of copolymer by SEM and proposed the possible mechanism for the enhancement of order parameter.

【References】

- (1) S. Samitsu, Y. Takanishi, and J. Yamamoto, Nat. Mater. 9, 816 (2010).
- (2) C. Y. Chien and J. Yamamoto, 27th International liquid crystal conference(2017) P1-C2-23

This work was supported by JST CREST (Grant Number JPMJCR1424), Japan.

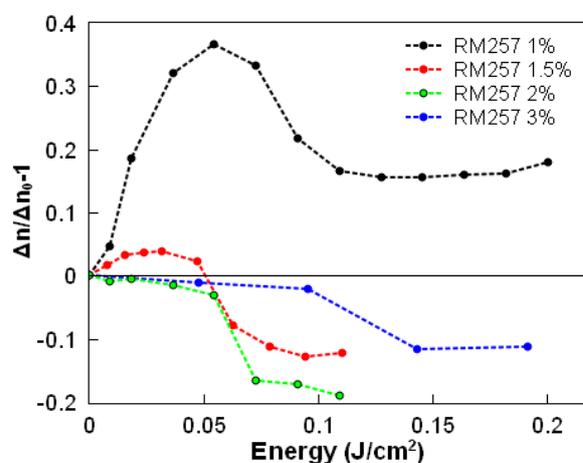


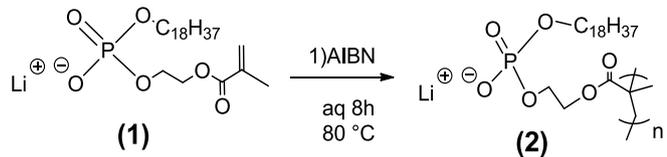
Figure 1 The photo-induced variation of birefringence was measured in different composition of copolymer dispersed in LC mixture. The birefringence was normalized by the initial state.

ベシクル膜中で膜分子生産反応の助触媒として働くアニオン性ポリマー

(神奈川大院理) 櫻井 詞・鈴木 健太郎・菅原 正

【はじめに】

我々は、触媒を含むベシクル型人工細胞に膜分子前駆体を添加すると、ベシクルが肥大・分裂し自己生産をする研究を行ってきた。そこに情報分子である DNA を内封すると、ベシクルの自己生産が著しく加速されることを見出している。これは、ベシクルに内封された DNA が、増幅に伴いカチオン性脂質に取り巻かれ、表面が疎水化してベシクル膜内に溶け込み、カチオン性の触媒(膜分子前駆体を膜分子に加水分解する反応を接触する)と複合体を形成し、膜分子生産の活性点となるためと考えられている。DNA のこのような役割を、膜になじむ合成高分子で置き換えられないかを検討するため、親水部を持ち、かつ重合反応性のあるメタクリレート部位が組み込まれたリン酸ヘテロジエステル骨格をもつ両親媒性分子を設計し、アミダイト法でモノマー(1)を合成した。このモノマー1を、AIBN を用いて重合させ、アニオン性のポリマー (2)を得た。ポリマーを添加したベシクルが膜分子の加水分解の反応性を確認し、アニオン性ポリマーが示す両親媒性触媒 C の助触媒としての相乗効果を検討した。



【結果と考察】

ポリマーの構造は ^1H -, ^{13}C -, ^{31}P -NMR で確認した。得られたポリマーの重合度は、フォスフェート基をメチル化した試料をゲル透過クロマトグラフィーで分析し、主に 5~7 量体を実験に用いた。POPC:POPG:合成したポリマーおよび両親媒性触媒 C を、モル比(2についてはホスフェート当り)で 8:1:1:1 の割合で混合し、薄膜法を用いてリン酸緩衝液中でのベシクルの分散液を調製した (pH7.9)。対照として、ベシクル分散液に V^* の buffer 溶液を加えた試料、触媒分子 C のみ、ポリマー2 のみの試料を調整し、こららに V^* を添加した時の加水分解速度を紫外可視分光計で測定した。

紫外可視分光計で測定した V^* の加水分解速度の測定結果を図1に示す。触媒 C およびポリマー2 双方を含んだベシクルに V^* を添加した際の、60 分経過した時点での V^* の変換率は約 20% となり、触媒 C あるいはポリマー2 をそれぞれ単独に持ったベシクルに V^* を加えた場合の変換率(11%、7%)の和よりも大きな値となった。このことは、ベシクル膜中でアニオン性ポリマーが触媒分子 C と複合体を形成し、助触媒として C の活性を高めていることを示している。

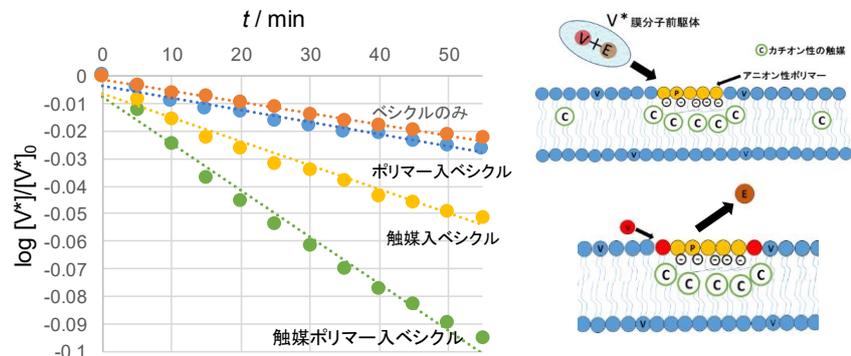


図1.(左)buffer中における V^* の加水分解反応追跡と、(右)C-ポリマー複合体を利用した反応の模式図

マイクロ閉じ込めと高分子混雑が導く遅い分子拡散

(東京農工大院工) 渡邊千穂、小堀雄大、柳澤実穂

【はじめに】

細胞中の分子拡散は不均一かつ異常拡散となることが明らかになってきている(1)。我々はその要因として、細胞内の高分子混雑と脂質膜によるマイクロ空間への閉じ込めに着目し、細胞モデル系を用いて解明を目指している(2)。本研究では、混雑分子形状の異なる2つの溶液系を用いてマイクロ閉じ込めサイズおよび脂質膜界面が分子拡散に与える影響を蛍光相関分光法(FCS)により解析した。

【実験結果】

混雑分子形状の異なる2つの溶液系として、球状高分子(ウシ血清アルブミン:BSA)+緑色蛍光タンパク質(GFP)、および線状高分子(ポリエチレングリコール:PEG)+蛍光分子(ローダミン6G:R6G)を用いた。まず、脂質膜で覆われた高分子マイクロ液滴中に各混雑溶液系を閉じ込め(図右)、蛍光分子拡散の閉じ込めサイズ R 依存性を調査した。いずれの溶液系においても、閉じ込めサイズの減少にともない、蛍光分子拡散が遅くなった。さらに、混雑分子自身の拡散についても調査した結果、同様に閉じ込めサイズの減少にともない遅くなることが明らかになった。これらの遅い分子拡散は、高分子混雑がある場合のみに観察され、希薄溶液や、高分子がない場合には観察されなかった。

次に、遅い拡散を引き起こす要因が、閉じ込めによるものか、脂質膜によるものかを明らかにするために、バルクの脂質膜界面を作成し、分子拡散の脂質膜界面からの距離 L_m 依存性を調査した(図左)。その結果、いずれの溶液系においても分子拡散は脂質界面からの距離に依存しないことが明らかになった。以上から、脂質膜界面ではなく、マイクロな閉じ込めが高分子混雑と相関することで、遅い分子拡散が導かれることが強く示唆された。直径数ナノメートルの分子の拡散が、1000倍以上の大きさのマイクロな閉じ込めにより遅くなることは、直感的には理解しにくい。以上の実験結果について議論したい。

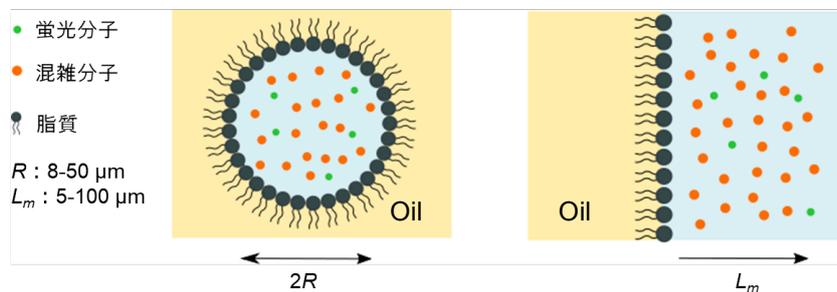


図 高分子マイクロ液滴(右)とバルク脂質膜界面(左)の模式図

【参考文献】

- (1) Li, *et al.*, 2015 *JACS*, 137:436-444; N. Dross, *et al.*, 2009 *PloS ONE*, 4:e5041.
- (2) Watanabe, Yanagisawa, 2018 *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20 (13): 8842-8847.