

アクティブソフトマターの非線形ダイナミクス

(京都大学 福井謙一記念研究センター) 多羅間充輔

【はじめに】

自分自身の内部で化学エネルギーなどを消費して自律的に運動するものをアクティブマターと呼ぶ。たとえば生物系で見られる多くの運動はその例であり、ミクロな分子モーターから微生物、生体細胞やマクロな生物個体まで様々なものが含まれる。また非生物の人工物質の系でも、たとえば水面に置かれた樟脳粒や油やアルコールの液滴などは、界面エネルギーの不均一性によって自律的に運動することが知られている。また表面の不均一なコロイド粒子や金属微粒子なども表面での化学反応により自発運動を示すことがある。

このようなアクティブマターという概念が提案されて以来、それまで別々に研究されてきた生き物と人工物質とが示す非平衡ダイナミクスを自発運動をキーワードとして同じステージで議論することが可能となり、この10年ほど世界中で盛んに研究されてきた。そのような研究が進む中で理論研究に求められる課題には大きく分けて二つある。一つは、個々の具体的な系に対する詳細なモデルによる解析によって、たとえば運動のメカニズムなどを明らかにすることである。もう一つは、生物系から物質系まで幅広く見られるアクティブマターに共通する普遍的な側面を抽出することである。そのためにはアクティブマターのダイナミクスに対する一般的な記述を発展させる必要がある。

【結果と考察】

我々はこれまで、自発的に運動する液滴や細胞のような形が変化するやわらかなアクティブマターに焦点を当て、そのダイナミクスの一般的な記述の構築を進めてきた。粒子の速度、回転、それぞれのモードの変形間の非線形カップリングを考慮して、それらの変数に対する運動方程式を対称性の議論により導出し、解析を行ってきた(1-5)。粒子の時間変化する形を記述する方法にはいくつかあるが、我々は体系的な取り扱いが可能なモード展開による方法を用いた。それぞれのモードの変形は対応する階数の対称テンソルを用いて表現することができ、そうすることで空間の次元によらない一般的な変形の表現が得られる(6,7)。また、アクティブソフトマターのダイナミクスに対する外力(8)や周囲の流れ場(9,10)の影響についても研究を進めてきた。本発表ではこれらの研究の中からいくつかを紹介する。

【参考文献】

- (1) T. Ohta and T. Ohkuma, Phys. Rev. Lett. **102**, 154101 (2009).
- (2) T. Hiraiwa, M.Y. Matsuo, T. Ohkuma, T. Ohta, and M. Sano, Europhys. Lett. **91**, 20001 (2010).
- (3) M. Tarama and T. Ohta, J. Phys.: Condens. Matter **24**, 464129 (2012).
- (4) M. Tarama and T. Ohta, Phys. Rev. E **87**, 062912 (2013).
- (5) M. Tarama, Y. Itino, A.M. Menzel, and T. Ohta, Eur. Phys. J. Special Topics **223**, 121 (2014).
- (6) T. Hiraiwa, K. Shitara, T. Ohta, Soft Matter **7**, 3083 (2011).
- (7) M. Tarama and T. Ohta, Prog. Theor. Exp. Phys. 013A01 (2013).
- (8) M. Tarama and T. Ohta, Eur. Phys. J. B **83**, 391 (2011).
- (9) M. Tarama, A.M. Menzel, B. ten Hagen, R. Wittkowski, T. Ohta, and H. Löwen, J. Chem. Phys. **139**, 104906 (2013).
- (10) M. Tarama, A.M. Menzel, and H. Löwen, Phys. Rev. E **90**, 032907 (2014).

コロイド分散系シミュレーターKAPSEL を用いたペーストの流れの記憶の数値実験

(日本大学理工) ○石川諒馬, 高橋秀典, 松尾洋介, 村松旦典, 中原明生

【はじめに】

干上がった沼地などでは等方的でランダムな乾燥亀裂パターンを観測できる。一方、実験では乾燥前に高濃度の固液混合液(ペースト)に与える外力を御制することで亀裂パターンを自在にコントロールできる^[1]。これは、ペーストが塑性という性質を有することに起因する。炭酸水酸化マグネシウムと純水から成るペーストの場合、乾燥前に1分のみ水平加振をしておくだけで、加振中につくられた流れの方向を記憶し、流線に平行に亀裂が走る(流れの記憶)。しかし、ペーストが流れを記憶できるメカニズムは解明されていない。そこで我々は、異方的な亀裂の種となるのは粒子配置の疎密構造であろうと仮説を立て、シミュレーションで液体と相互作用する粉粒子の動きを追跡することで、メカニズム解明を試みた。はじめに、粒子の体積比率、ポテンシャルエネルギー、剪断速度を変数として、粒子の構造形成を観察し、形態相図を作成することで、粒子が構造を作りやすい領域を確認した。次に、特徴的な構造を見やすくするために、水平方向(x方向)にだけシステムサイズを拡張し、得られた結果の速度分布や密度分布を調べた。最後に、加えていた剪断を途中で停止させ、その場合にも特徴的な構造は残されているのかを確かめた。なお、本シミュレーションには、KAPSELというコロイド・微粒子分散系の動的現象を計算するために開発されたものを利用した^[2-3]。

【結果と考察】

シミュレーションにより以下の結果を得た。
①適度な粒子体積比率、剪断速度、ポテンシャルエネルギーにより剪断方向に引き伸ばされたクラスターが作られる。
②剪断速度が大きいと対向流による縞模様を作られ、流れの-span方向(x方向)にシステムを広げることで縞の組数も増える(Fig.1).
③作られた対向流(y方向)による異方的な粒子の空間密度分布は剪断を途中で止めても残される(Fig.2)。この結果を実験結果^[1]と比較すると自然な結果が得られたと考えられる。

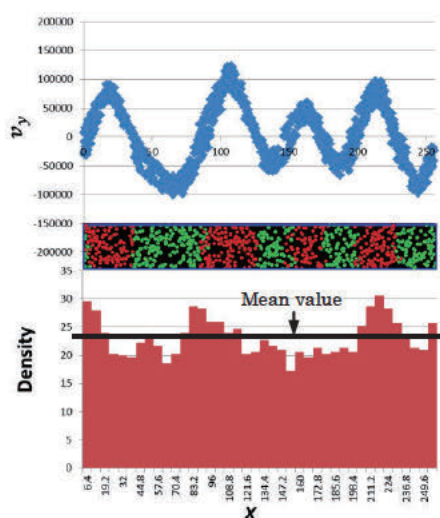


Fig.1 Snapshot of particle configuration under shear taken as a top view and spatial distributions of velocity of particles and density at $t = 0.1$. Red particles are moving to the negative direction of the y-axis. In contrast, green particles are moving to the positive direction of the y-axis.

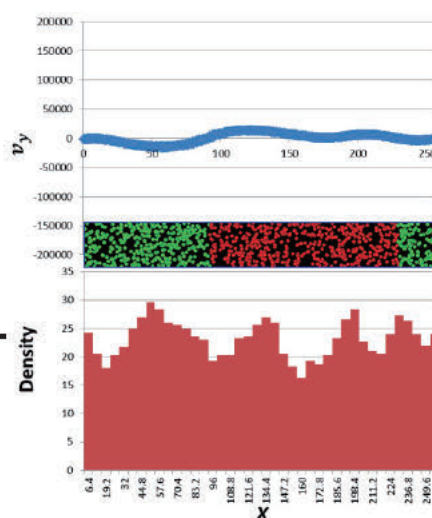


Fig.2 Snapshot of particle configuration at $t = 0.25$ after the shear motion is stopped at $t = 0.1$. The figure is taken as a top view and spatial distributions of velocity of particles and density. Red particles are moving to the negative direction of the y-axis. In contrast, green particles are moving to the positive direction of the y-axis.

【参考文献】

- (1) 中原明生, 松尾洋介, 大信田丈志, 「ペーストの記憶効果と破壊の制御への応用」日本物理学会誌 第70巻 (2015年) 第3号 179-187.
- (2) <http://www-tph.cheme.kyoto-u.ac.jp/kapsel/>
- (3) Y. Nakayama, R. Yamamoto, Phys. Rev. E **71**, 036707 (2005).

粉体振動層における底壁圧力のスケーリング

(名古屋大学大学院環境学研究科) 桂木 洋光

【はじめに】

ガラスビーズや砂などの乾燥した粉体に振動を加えると、粉体対流やそれに伴うサイズ分級、表面定在波など様々な現象が観察される(1)。これらの現象は一見直感に反しており、パターン形成の問題としても非常に興味深い話題を提供するが、振動が加えられた粉体層がどのような力学的特性を示すのか、という問題については、意外にもまだ十分には理解されていない。粉体振動層の運動を記述するモデルとして最も単純なものとしては例えば **Inelastic Bouncing Ball Model (IBBM)** (2)があるが、これも運動学的記述にとどまっており、力を含めた動力学的記述までは踏み込んでいない。

粉体振動層で起こる様々な現象の統一的理解のためにはその力学的特徴付けが必要となる。粉体振動層のレオロジー的観点からの特徴付けを目指した実験はこれまでいくつか報告されている(3)。しかし、それらの先行研究ではいずれも振動の強度（振動による最大加速度と重力加速度の比 Γ で定量化される）が小さい領域（ $\Gamma < 1$ ）での特徴付けが行われており、粉体振動層の系統的理解はまだ得られていない。

そこで本研究では、 Γ が 1 より大きな領域における粉体振動層の力学的特徴付けを目指し、粉体振動における底面圧力を計測する実験を行った。得られたデータをもとに、底面圧力の振動強度依存性についてスケーリングの手法を用いて解析した結果について報告する。

【結果と考察】

円筒容器（内径 D ）にガラスビーズ（粒径 d ）を厚さ H まで積層させ、振動強度 Γ ，角周波数 ω ，振幅 A で系を振動させたときの底面圧力 p を計測し、各振動サイクルでの圧力の最大値 p_m のスケーリングによる特徴付けを試みた。実験条件を様々に変化させ p_m の挙動を系統的に確認した結果、

$$\frac{p_m - p_J}{p_J} \sim \left(\frac{\sqrt{dg}}{\omega H} \right)^{1/4} \Gamma$$

という関係を得た(4)。ここで、 p_J はヤンセン効果による圧力の飽和値、 g は重力加速度の値を示す。この関係は、規格化された圧力値が振動強度の指標である Γ に加えて非自明な無次元数の $1/4$ 乗に依存することを示している。この無次元数依存性（スケーリング関係）の物理的解釈はまだ十分に得られていないが、いくつかの可能性について報告する。

【参考文献】

- (1) I. Aranson and L. Tsimring, *Granular Patterns*, Oxford Univ. Press (2009).
- (2) A. Mehta, *Granular Physics*, Cambridge Univ. Press (2007).
- (3) P. Umbanhowar and M. van Hecke, *Phys. Rev. E* **72**, 030301 (2005); C.-J. Hsu, et al., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 058001 (2009); G. H. Wortel, et al., *Phys. Rev. E* **89**, 012202 (2014).
- (4) H. Katsuragi, *Sci. Rep.*, in press (2015).

乾燥前の揺れによって生じるペースト乾燥中の応力異方性の発達

(奈良女子大学・研究院自然科学系・物理学領域) 狐崎 創

(日本大学・理工学部) 中原 明生

(日本大学・理工学部) 松尾 洋介

【はじめに】

粘土やペンキのような固体の微粒子と水を混ぜたペーストは、間隙水の減少とともに降伏応力が増加する塑性流体であり、乾燥前の液体的な状態で与えた様々な外力の履歴がペースト内部に何らかの形で残り、乾燥後に形成される亀裂の方向を決めるという記憶効果が知られている[1]。中でも降伏応力以上でペーストを短時間水平加振すると、乾燥後に振動に垂直な亀裂が形成される「揺れの記憶」は、多くの種類のペーストで見られる一般的な現象であり、理論的にも加振によって弾塑性体に残留応力の異方性が生じることが示され理解が進んでいる[2,3]。

記憶効果によって生じた異方性を、亀裂形成以前に検出することは困難であったが、我々は、柔らかい底を持つ容器を使うと、図1のように乾燥とともに初期に与えた振動方向に容器が反ることを見つけた(スルメ実験と呼ぼう)。本研究ではこの現象を利用して応力測定を試みた。

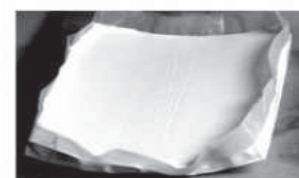


図1:スルメ実験
(矢印は加振方向)

【結果と考察】

図1のスルメ実験からは応力の大小関係しかわからないので、図2のように正方形の底板の4方向に平らな底の延長になるように4個の板バネを取り付けた容器を作成し、各バネの曲げ変位をレーザー変位計で測定し水平応力を推定した。結果、初期加振に垂直な方向と平行な方向で、応力変化に違いがあり、亀裂形成前にも応力異方性が存在することが確認された。検出された応力差は応力自体に比べかなり小さいが、異方性が乾燥とともに拡大していることがわかった。このような応力差の拡大と亀裂形成はペーストが非線形弾性をもつと仮定して定性的に説明できる。しかし、亀裂直前までペーストが容易に降伏する状態であることもまた引張圧縮試験機を用いた測定から明らかになり、弾塑性を考慮する必要性が示唆された。

【参考文献】

- (1) A.Nakahara and Y.Matsuo, J.Phys.Soc.Jpn. 74(2005) 1362
- (2) M.Otsuki, Phys.Rev.E 72(2005) 046115,
- (3) Ooshida Takeshi, J.Phys.Soc.Jpn.78(2009) 104801

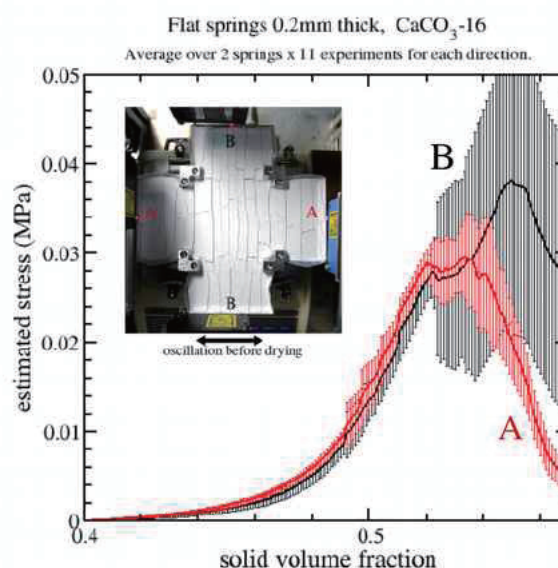


図2: 乾燥に伴う初期加振に平行(A)と垂直(B)な方向の推定応力の増加。

シワ構造が生み出す機能

(産総研 機能化学部門) 大園 拓哉

【はじめに】

界面は、多くの現象に物理的境界条件として関わる。例えば、表面の凹凸構造等の形状は、その界面を通過・反射する光の特性や、その表面上に置かれた液体の濡れ現象などに強く影響する。そのため、注目する物理現象と人工パターン等の構造との相関が様々な実験系で調べられてきている。その構造に影響された現象の出力状態、例えば、光の散乱具合や液体の濡れ具合といった状態、を外部からの刺激によってダイナミックに調節できることもある。この場合の動的な調節能は新たな機能となり、工学的応用の観点では特に価値がある。この動的機能の実現のために、例えば、その現象に強く影響する物理的境界条件、すなわち表面凹凸構造自体等、が可変なシステムが利用できる。また、このシステムは様々な物理現象と表面凹凸構造の相関を効率的に評価できる基礎実験のプラットフォームとしての活用も期待できる。そのシステムの典型例としてシワ＝リンクル構造に着目している。

【結果の概要】

ここでシワ構造とは、柔軟で平坦な基板上に作成された比較的硬い表面薄膜の非破壊的な座屈 (buckling) により発生する表面凹凸構造である。この座屈は弾性力学における非線形変形現象の一つであり、ここでは表面薄膜の面内方向に加えられた圧縮ひずみにより誘発される。その凹凸構造は、サイン波状の滑らかな断面形状を示し、用いる材料の力学特性（ヤング率等）や表面薄膜の厚みなどに応じた特定の周期を有する。結果としてその表面は凹凸の2次元ストライプパターンを呈する。この周期長はサブ μm 領域でも容易に調整でき、また試料一面にシワが自発形成される特徴がある。この構造の理解と応用を目指し、周期以外にも、“凹凸の深さ”やその“凹凸構造の面内異方性”等の構造の制御に関して研究が進む。それらは、座屈を誘起する面内圧縮ひずみの“大きさ”と“面内異方性”に、それぞれ係わることが分かってきた。我々は、この構造を律する圧縮ひずみが、実験的に容易に可変である点に注目し、凹凸の深さやストライプ方向の異方性の可変性を明らかにしてきた(1)。

この周期的凹凸構造であるシワは、多様な現象の物理的境界条件として利用できる。特にこの形状可変性を通じて、その境界条件を変えることができ、以下のように、物理現象の状態制御を可能とする。①光拡散現象：光の波長より十分大きい周期を有するシワでは、その表面にて透過・反射する光は幾何光学的に拡散される。よって、シワの深さを調節すると、光拡散の程度が制御できる。②液体毛管現象：シワの溝をオープンな毛細管とみなすと、溝に液体が浸透する毛管現象の発生条件は溝断面のアスペクト比に関係するので、シワの深さによって毛管現象を制御できる。③液晶配向現象：ネマチック液晶は表面凹凸構造の異方性に応じて配向しうるので、シワの溝方向の異方性を変化させることで、液晶配向を可逆的に変えられる。④摩擦現象：摩擦力は表面の形状に依存して変わるため、シワの形状変化で摩擦力や摩擦状態を調節できる。

以上のように、この形状可変なシワ構造は、多様な現象に対する可変な物理的境界条件として、その状態を変化・調節するために活用できる(2)。また、これらの現象を元にして新たな科学的発見や応用も期待できる（例えば、シワ構造を境界とした液晶内部に周期構造を誘起し、それがキラルセンサーとして活用できる例を見つけている(3)）。

【参考文献】

- (1) T. Ohzono and H. Monobe, *J. Colloid Interface Sci.* **369** (2012) 1.
- (2) 大園拓哉 日本物理学会誌 **70** (2015) 253.
- (3) T. Ohzono, T. Yamamoto and J. Fukuda, *Nat. Commun.* **5** (2014) 3735.
- (4) 本内容の一部は、科研費新学術領域「生物規範工学」(No.24120003)の助成に基づく。また、産総研物部浩達氏・福田順一氏、鈴木航祐氏、東北大内田就也氏を始め、本内容に関わる共同研究者に感謝申し上げる。

くさび型における物理ゲルの対流ダイナミクス

(首都大物理) 小林 和也、及川 典子、栗田 玲

【はじめに】

物理ゲルは高分子鎖が三次元の網目構造を形成し、その内部に溶媒を内包し膨潤することで構造を保ち、弾性や液体性、輸送性を併せ持つ機能性物質であり、食品から生体組織まで重要な役割を果たしている。物理ゲルの架橋点は *van der waals* 力程度の比較的弱い相互作用で形成されているため、ある転移点を境に熱可逆的にゾル・ゲル転移することができる。物理ゲルは食品をはじめ生体組織まで幅広く応用されているにもかかわらず、物理ゲルの熱輸送に関する研究はあまり行われていない。

物理ゲルの熱輸送は非平衡物理としても興味深く、流体の上面を冷却し、下面を均一に加熱することによる密度差によって発生する熱対流はレイリー・ベナール対流とも呼ばれ、これまで典型的な非平衡系現象として研究が行われている。しかしながら、物理ゲルのように粘性が温度に強く依存する系における研究はあまり行われていない。このような粘性が温度に対して大きく変化する系はマントルなどの地球科学とも関連する。マントル対流に関する研究では粘性の温度 (a)

依存性は非常に重要である。
さらに熱対流に関する研究では、上面を均一に冷却して実験が行う多く、実験的にも上面を不均一に冷却した場合における熱対流現象に関する研究も少ない。

そこで本研究では下面全体を一様に加熱し、上面を不均一に冷却することによって粘性の温度依存性が大きい物理ゲルの熱輸送現象がどのように変化するかを実験的に調べた。

【結果と考察】

実験の結果、物理ゲルは上面の温度不均一によって系内部で不均一に粘性が大きく変化し、ゾル・ゲル転移点を境に自発的にゾル領域がくさび型のように分離し、そのくさび内部でサイズの異なる複数の対流が発生する。そして発生した大きい対流渦は次第に小さな対流渦に押されるようにくさび内部を先端側（細径側）から末端側（太径側）へ移動する現象が起こることを発見した。本研究会では、この実験結果について具体的な説明を行う。

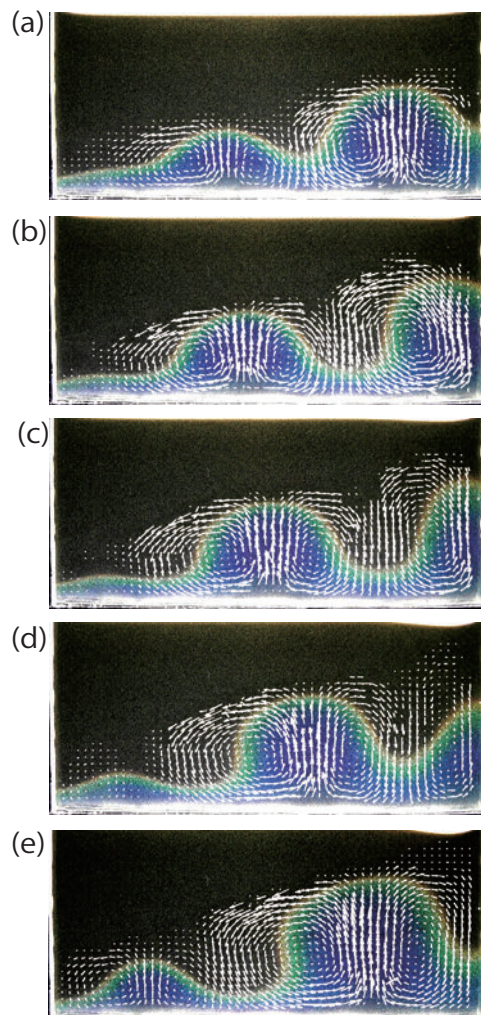


Fig1: くさび内部における対流の移動 (a) 30 min, (b) 40 min, (c) 50 min, (d) 65 min, (e) 80 min

等方-コレステリック二相共存系における熱駆動回転運動と対流構造

(早大理工) 吉岡 潤、多辺 由佳

【はじめに】 コレステリック(Ch)液晶に対して熱流を印加すると配向方向が一方向に回転する現象は Lehmann 回転と呼ばれており、その機構は Leslie の理論によって現象論的に説明されている[1]。近年、この Lehmann 回転の存在を示唆するものとして、等方(I)相 - Ch 相共存状態(I+Ch)において系に温度勾配を印加することによって、等方液体媒質中に分散しているコレステリック液晶滴 (Ch 液晶滴) 上の組織が回転する現象が報告された[2,3] (図 1)。しかしながら、複数のグループにおいてこの現象が再現性良く報告されていく一方、バルクの Ch 液晶において Lehmann 回転を誘起したという報告例は未だ極めて少なく、その存在が十分に実証されていると言えない。このことは、I-Ch 共存状態にあるということが、大きな回転のトルクを生じさせる要因となっていることを示唆している。そこで我々は、同じ共存状態として Ch 液晶中に液滴が分散している系を構成し、温度勾配を印加し回転運動を誘起することを試みた。

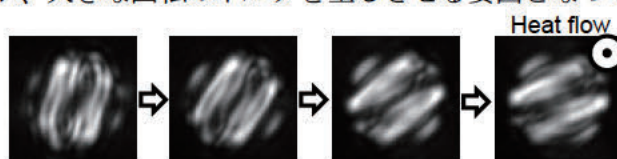


図 1: 等方相中に分散した Ch 液晶滴における熱駆動回転運動(interval:6sec)

【結果と考察】 本研究では、Ch 液晶試料としてネマチック液晶混合物 (5CB -No.270032 混合系、LCC 社) にカイラル添加剤 S811 を 1wt.% 添加したものを用いた。試料の相系列は S811 の濃度により依存せず、I-58℃-I+Ch-54℃-Ch である。また、セル基板には垂直配向剤 A14811 を塗布した。上記の試料を用いて Ch 相からの昇温によって Ch 液晶中に液滴を作製し、偏光顕微鏡を用いて観察したところ、図 2 に示すように液滴直上の Ch 液晶領域に渦巻き状の組織が発現した。さらにこの系に温度勾配を印加したところ、上記の渦巻き状の組織が回転することが判明した。このとき、回転方向は同じ試料を用いて Ch 液晶滴を作製したときに誘起される熱駆動回転運動の方向と反対であった。

上記の熱駆動回転運動の起源を解明すべく、蛍光褪色法を用いて温度勾配印加時の I-Ch 共存系における流動場を測定した。その結果、温度勾配印加時には液晶滴、液滴の系の両方において滴を核とした対流構造が誘起されていることが判明し、さらに対流の向きは液滴と液晶滴の系の場合で反転することが分かった。このことは、温度勾配印加によって誘起される対流構造と Ch 液晶におけるらせん構造の結合が、I-Ch 共存系における熱駆動回転運動の起源になっていることを強く示唆している。詳細は発表で述べる。

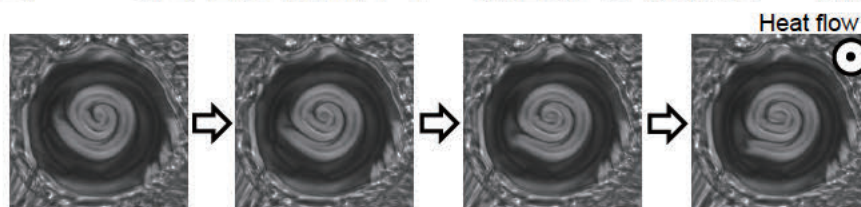


図 2: Ch 液晶中に液滴を分散させた系における熱駆動回転運動(interval:3sec)

- 【参考文献】 [1] S. Chandrasekhar, “Liquid Crystals”, Cambridge University Press 2nd edition (1992)
 [2] P. Oswald and A. Dequidt, Phys. Rev. Lett. 100, 217802 (2008)
 [3] J. Yoshioka, F. Ito, Y. Suzuki, H. Takahashi, H. Takizawa and Y. Tabe, Soft Matter, **10**, 5869 (2014)

ダイラタント流体のずり粘化メカニズムと負圧を伴う粘化領域

(仙台大専) 永弘進一郎

(九大理) 中西秀

(NBI)御手洗菜美子

【はじめに】片栗粉やコーンスターチと水を混ぜた濃厚な懸濁液はダイラタント流体と呼ばれ、せん断応力がある値を超えると粘性が不連続に増加する激しいずり粘化 (shear thickening) を起こす。我々はこれまでに、ダイラタント流体の現象論的モデルとして、ずり応力粘化を取り入れた流体力学を提案し、外からの一定せん断応力に対して媒質が、粘化状態と流動状態を交互に繰り返す自励振動を起こすことを理論的に予言した (ずり粘化振動)。さらに、片栗粉の懸濁液を同心円筒内に満たして内側の円筒を一定のトルクで回転させるTaylor-Couette 流れの実験を行ったところ、確かに20Hz 程度の振動が発生することを見いだした[1]。

【ずり粘化のメカニズム】ずり粘化の機構については、(i)粉体粒子の接触摩擦によるジャミングが原因とする説と、(ii)粉体のレイノルズ膨張によって発生する間隙流体の負圧を原因とする説が知られている。前者は、レオメータによる実験で系に加えたせん断応力に比例する正圧が観測される事実[2]や、単純せん断流のシミュレーションにおいて、ずり粘化が生じるためには粒子間摩擦が必須であるという結果から支持される[3, 4]。しかし、ずり粘化振動において、外側の円筒のある一点で懸濁液の圧力を測定すると、間欠的に負圧と正圧が両方とも観測され、主に負圧の領域が支配的であることを我々は見いだした[5]。現象論モデルによるシミュレーションも、実験とよく一致する結果を与える。これらの結果は、流体内において粘化領域は局在化したバンド構造を形成し、正圧を伴う粘化バンドと、より支配的な負圧を伴う粘化バンドが両方とも存在していることを示している。

以上から我々は、ダイラタント流体のずり粘化においては、ジャミングによる粘化と間隙流体の負圧を原因とする粘化の2種類が共存して発生していると考えている。この主張の根拠について、現象論モデルによる3次元シミュレーションと幾つかの実験からをもとに詳しく報告する。

[1] S. Nagahiro, N. Mitarai and H. Nakanishi, Europhys. Lett. 104, 28002 (2013)

[2] D. Lootens, H. van Damme, Y. H_emar, and P. H_ebraud, Phys. Rev. Lett. 95, 268302 (2005)

[3] M. Otsuki and H. Hayakawa, Phys. Rev. E 83, 051301 (2011)

[4] R. Seto, R. Mari, J. F. Morris and M. M. Denn, Phys. Rev. Lett. 111, 218301 (2013)

[5] S. Nagahiro, N. Mitarai and H. Nakanishi, 投稿準備中

相溶性高分子ブレンドの絡み合い

(京大化研) 渡辺 宏

【はじめに】 絡み合い緩和は高分子物理学の基本問題であり、ホモポリマー系については、多体のトポロジ的相互作用を平均場中の 1 体問題として捉える管モデルが、不完全ながら成功を収めている。また、このモデルの基本パラメタのひとつである絡み合い長 a は、1 本の高分子鎖の形態を特徴づける packing 長 $p = v_K/b_K^2$ (v_K, b_K は Kuhn segment の占有体積とステップ長) で決定されるものと理解されている ($a = 20p$).¹⁾ このような理解が相溶性高分子ブレンドにそのまま拡張・適用できるかどうかを調べることは、絡み合いの本質を検討する上で興味深い。この観点から、本発表では、大きな動的非対称性を持ちながら相溶性を示すポリイソプレン (PI) とポリ(*p*-tert ブチルスチレン) (PtBS) のブレンド系について、絡み合い長の組成依存性を検討する。²⁾ (時間が許せばダイナミクスについても言及したい。)

【結果と考察】 分子量 $M_{PI} = 32.1$ 万の PI と $M_{PtBS} = 21.9$ 万~72.9 万の PtBS を成分とする相溶性ブレンドに対して粘弾性測定を行い、データを解析して絡み合い剛性率 G_N を決定した。²⁾ (この解析はレオロジーデータに対する考察を要求するが、ここでは触れない。) 得られた G_N を 40°C に規格化し、PI 重量分率 w_{PI} に対してプロットした結果を図 1 に示す。 M_{PtBS} によらず G_N は精度良く決定されている。

絡み合い長 a に対して下記の混合則が提唱されている。²⁾

$$1/a = v_1/a_1 + v_2/a_2 \quad (1)$$

$$a = n_1 a_1 + n_2 a_2 \quad (2)$$

これらの混合則が与える $G_N = \nu k_B T$ を図 1 に曲線で示す。ここで、 ν は大きさ a を持つ絡み合いセグメントの数密度であり、PI (成分 1) と PtBS (成分 2) の双方が ν に寄与する。

eq 1 は、ブレンド中の成分 1, 2 がランダムに混合し、均一な絡み合い場を形成するという平均場描像から導出される。²⁾ 図 1 のデータは、eq 1 では記述されない。この実験事実は、ブレンド中の絡み合いが平均場描像では記述しきれないことを意味する。恐らく、bulky で堅い PtBS 鎖と柔らかい PI 鎖の混合の際には、PtBS 鎖の周りに PI 鎖が濃縮されて packing entropy が増加している。この濃縮効果は、平均場描像のランダム混合の場合に比べ、PtBS 鎖に対する動的拘束 (絡み合い) を増強する。eq 2 は、ブレンド中の平均 packing 長の加性を仮定して導出されたものであり、定性的に、この増強効果を反映する。このため、データが式 2 で記述されたものと思われる。

【参考文献】

- (1) Fetters et al., *Chain Dimensions and Entanglement Spacings*, in *Physical Properties of Polymers Handbook*, 2nd ed.; Mark, J. E., Ed.; Springer: Berlin, 2007; Chapter 25.
- (2) Matsumiya et al., *Macromolecules* **2015**, *48*, 7889.

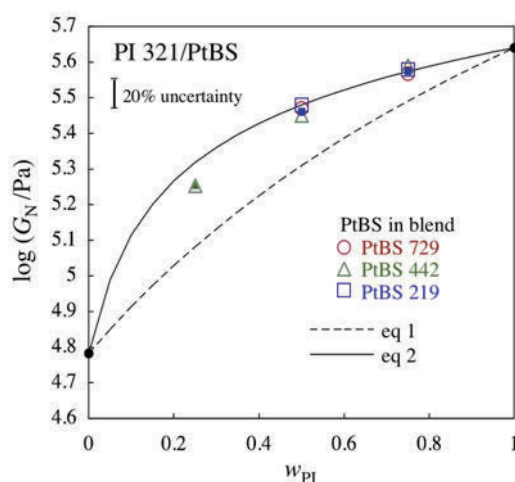


図 1. PI/PtBS ブレンドの絡み合い剛性率の組成依存性

高分子溶液の非線形電気浸透における流体相互作用の効果

(京都大学理学研究科) 植松 祐輝

【はじめに】

毛細管の中に電解質溶液を満たし電場を管に平行方向に掛けると、電気二重層に駆動され溶液が流動する。管中央部では速度は一樣で電場に比例し、この比例係数を電気浸透の移動度と呼ぶ。同じことを高分子溶液で行うと、移動度に電場依存性が現れ、非線形の電気浸透を示す。この現象は理論的には高分子溶液のシアニングという非線形構成方程式の結果として論じられてきた。近年になって壁付近の高分子が一樣シア流の下で、壁に対してどちらの向きに動くのかが理論と実験で調べられ、流体相互作用を正しく考慮すると高分子には壁から離れる向きに動くことが分かっている。そこで、本研究はブラウン動力学シミュレーションにより電気浸透流中の壁付近の高分子濃度プロファイル进行計算し電気浸透の移動度がなぜ非線形性になるかを明らかにした(1)。そして、高分子溶液の非線形電気浸透は非線形構成方程式が原因ではなく、壁と高分子との流体力学相互作用による枯渇層の形成が重要であることを示した。

【結果と考察】

図1は電場を加えた時の高分子濃度を壁からの距離について図示したものである。平衡状態では高分子の大きさ程度の枯渇層があるが、電場を加えるにつれて枯渇層が大きくなり、さらにピークが現れることが分かった。図2は高分子濃度プロファイルと移動度の電場依存性についてシミュレーション(点)と理論計算(赤線)の結果を比較したものである。両者はおおよそ定量的にも合致している。移動度は電場に関して増大し、非線形の電気浸透を高分子溶液が示すことが分かった。さらにこれらの結果は高分子のモデルの詳細に寄らず、従って高分子の構成方程式の非線形性は、非線形電気浸透の直接の原因ではないことが分かった。

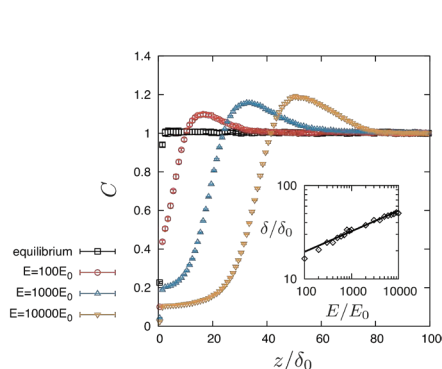


図1. 電場を掛けた時の高分子濃度プロファイル。インセットはピーク位置の変化。

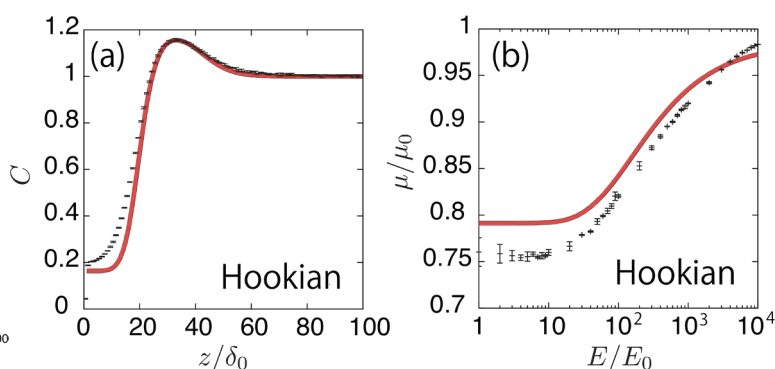


図2. (a)高分子濃度プロファイルのシミュレーション(点)と理論計算(赤線)の比較。(b)電気浸透移動度のシミュレーション(点)と理論計算(赤線)の比較。

【参考文献】

- (1) Yuki Uematsu, Soft Matter 11, 7402-7411 (2015).

永久網目鎖中の会合性高分子網目の線形粘弾性の解析

(大阪大学大学院理学研究科) ○片島 拓弥、井上 正志

(東京大学大学院工学系研究科) 酒井 崇匡

【はじめに】

高強度高分子ゲルのひとつとして、double network ゲルがある。¹ double network ゲルは結合強度の異なる 2 種類の網目を相互侵入させて調整される。変形時に弱い網目が率先して切れることで、系全体の破壊を阻害している。このメカニズムを利用して、高強度ゲル材料が数々研究されている。通常、このような相互侵入網目 (IPN) では、共有結合によって網目が形成されるため、一度切断された網目は回復せず、長期に渡る使用時の課題が残っていた。そこで近年、犠牲網目に可逆的な網目を用いることで、長期間の使用に耐えられる試みがなされている。しかし、IPN 内における一時的網目の動的挙動の体系的な理解はなされていない。その原因のひとつに、網目に存在する不均一性がある。網目の不均一性は構造パラメータを曖昧にし、物性の分子論的な理解を妨げる。近年、酒井らによって 4 分岐星形高分子を相互連結させることで、不均一性を高いレベルで排除した Tetra-PEG ゲルが開発された。² これまでの研究から、Tetra-PEG ゲルの弾性は化学架橋のみに起因し、構造パラメータを制御することが容易であることがわかってきた。

そこで本研究では、Tetra-PEG ゲルをモデルシステムとして用い、ゲル内に形成された可逆網目の動的挙動を調べた。可逆網目としては、会合性高分子である両末端疎水化ポリエチレンオキシド (HEUR) を用いた。HEUR は疎水性相互作用による会合性架橋点を有する一時的網目を形成する。Tetra-PEG ゲルと HEUR を用いることで相互侵入網目を作製し、その構造パラメータと動的な粘弾性挙動の相関を解析した。

【結果と考察】

Figure 1 には IPN の動的粘弾性測定結果を示す。 G' が $\omega > 0.2 \text{ s}^{-1}$ 周辺で緩和を示し、高周波数側と低周波数側に 2 つの平坦部を示した一方で、 G'' は明確なピークを示した。Tetra-PEG ゲル、HEUR 単体のスペクトルと比較をすると、緩和ピークの位置が低周波数側にシフトしていることがわかる。また、高周波数側の G' の値は、Tetra-PEG ゲルと HEUR 溶液の単純な足し合わせの結果の値よりも高い値を示した。これらの結果から、Tetra-PEG ゲルと HEUR は絡み合いを形成し、相互作用を及ぼし合っていることが示唆される。本発表では、絡み合いの影響と、ゲルの網目鎖濃度や架橋点間分子量などの構造パラメータの相関について議論する。

【参考文献】

1. Gong, J. P.; Katsuyama, Y.; Kurokawa, T.; Osada, Y. *Advanced Materials* 2003, 15, (14), 1155-1158.
2. Sakai, T.; Matsunaga, T.; Yamamoto, Y.; Ito, C.; Yoshida, R.; Suzuki, S.; Sasaki, N.; Shibayama, M.; Chung, U. I. *Macromolecules* 2008, 41, (14), 5379-5384.

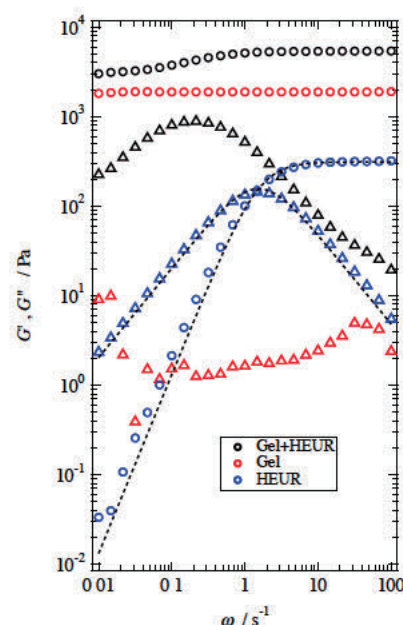


Figure 1.
Frequency-dependence of G' and G'' for the Tetra-PEG gel (red), HEUR aqueous solution (blue), and the IPN (black).

タンパク質吸着による生体膜の形態変化

(東大物性研) 野口 博司

【はじめに】

生体膜に囲まれた様々な形状の細胞内小器官があるが、それらの形状は時々刻々と動的に変化している。これらの形状を決めるメカニズムの解明を目的として研究を行っている。最近、生体膜に吸着するバナナ状の BAR ドメインを持つタンパク質が多く見つかっている。吸着ドメインが曲率を持つため、ドメインに沿って脂質膜を曲げてチューブ状に変形させる。しかし、これらのチューブ形成機構の詳細はまだよくわかっていない。

我々はメッシュレス膜模型を用いたシミュレーションによってこのようなバナナ状タンパク質の自己集合とそれに伴う膜変形を研究した。タンパク質は膜粒子をつないだ曲がった棒として粗視化した。

【結果と考察】

タンパク分子同士に直接の引力を与えなくても、タンパク質の自発曲率を上げていくと膜を介した相互作用で自己集合する。しかし、通常の相分離と異なり、この集合はタンパク質の軸に沿った方向と垂直方向の2つの1次元の集合に分かれて起こることを明らかにした[1]。ベシクルでは自発曲率を上げていくと赤道上への集合がまず起こり、その後、一箇所に集合する。集合に伴いベシクルは変形する。高タンパク密度では多面体状ベシクルが形成する[2]。

また、これまでの研究ではタンパク質に沿った自発曲率のみが考慮されていたが、側方に弱い自発曲率を加えることでチューブ形成のダイナミクスが大きく変わることが分かった[3]。平衡状態の性質はそれほど変化しないが、集合途中にみられるネットワーク構造の安定性が変わることによって、チューブ形成速度が大きく変わる。側方に負の自発曲率を持つ場合、図1に示すように膜全体に広がったネットワークを形成し、ネットワークからチューブが伸びる。それに対して、側方に正の自発曲率を持つ場合は、ネットワークは形成せずに、多くの短いチューブが形成される。このように、側方方向の相互作用も無視できないことが明らかとなった。

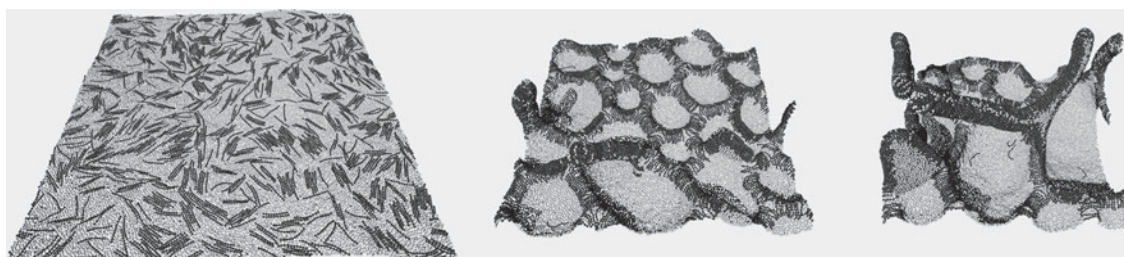


図1. バナナ状タンパク質によるチューブ形成。タンパクが側方に負の自発曲率を持つ場合、中間構造としてネットワークを形成する。

【参考文献】

- (1) H. Noguchi, EPL 108, 48001 (2014).
- (2) H. Noguchi, J. Chem. Phys. 143, 243109 (2015).
- (3) H. Noguchi, arXiv:1503.00973.

ベシクルの分裂に関する分子動力学シミュレーション

(山口大院理工) 浦上直人

(東北大院理工) 今井正幸

【はじめに】

生命現象において、細胞分裂は最も基本的なプロセスのひとつである。近年、人工生命の研究において、ベシクル外部から脂質分子前駆体を供給することで、ベシクルが分裂する様子を観察している(1)。また、シリンダー型と逆コーン型の2種類の脂質だけで構成したベシクルにおいても、温度をコントロールすることにより、ベシクルの分裂が観察される(2)。これらの実験結果は、タンパク質などにより細胞分裂がコントロールされているのではなく、単純な物理的プロセスにより細胞が分裂することを示唆している。そこで本研究では、分子動力学シミュレーションを行うことにより、ベシクルが分裂するために必要な条件を明らかにすることを目的とする。

【シミュレーション方法】

脂質分子を親水性2粒子、疎水性4粒子をもつ直鎖上分子とし、親水性粒子と疎水性粒子の大きさを変えることで、シリンダー型と逆コーン型の2種類の脂質分子をモデル化した。水分子は親水性1粒子でモデル化した。シリンダー型の脂質分子は5,200、逆コーン型の脂質分子は1,300、合計6,500の脂質分子でベシクルを構成し、水分子数211,000を配置した系で、温度・圧力一定のシミュレーションを行った。シミュレーションポテンシャルはMarkvoortら(3)のものを参考にした。

【結果と考察】

Fig. 1 にシミュレーションで得られたベシクル分裂の様子を示す。Fig. 1(a) は初期状態であり、ピーナツ型のベシクルを用いた。ベシクル内の水分子数は13,376、2分子膜の外側と内側の脂質分子数差は $\Delta N = 2,382$ である。2分子膜の内側に逆コーン型の脂質分子を多く配置している。時間経過とともにピーナツ型のベシクルのネック部分が細くなり、ベシクル内の水分子が2つに分かれる。そして、ベシクルの形状はlimiting shapeに変化した(Fig. 1 (b))。最終的に、ネック部分が切れ、ベシクルが分裂する様子を再現することができた(Fig. 1 (c))。2分子膜内外の脂質分子数差 ΔN の異なるベシクルを初期状態としてシミュレーションを行ったところ、分裂が観察できる ΔN の領域が存在することが分かった。

【参考文献】

- (1) K. Kurihara *et al.*, *Nat. Chem.*, 3 (2011) 775-781.
- (2) Y. Sakuma and M. Imai, *Phys. Rev. Lett.*, 107 (2011) 198101.
- 神保岳大ら、第4回ソフトマター研究会予稿 (2014).
- (3) A. J. Markvoort *et al.*, *Biophys. J.*, 99 (2010) 1520.

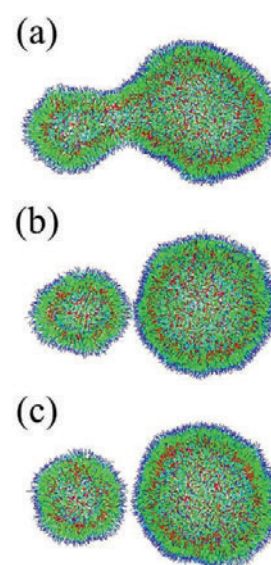


Fig. 1 Simulation snapshots of the process of vesicle division. (a) Initial state, (b) limiting shape, (c) vesicle division.

Lateral migration of cells in the blood

(秋田県立大学) Stephanie Nix

【はじめに】

Cells in the blood undergo migration perpendicular to the direction of flow while they flow along the direction of the surrounding flow. This process is referred to as lateral migration. Understanding the lateral migration of deformable bodies is necessary for fields as diverse as the development of microfluidic devices, such as those that sort cells, to the understanding of phenomena that occur within the body such as immune system functioning and coagulation. However, the physical and biological factors in play in the lateral migration of blood cells is still unclear. In this study we examine the hydrodynamic forces behind the lateral migration of a single blood cell using numerical simulation.

【結果と考察】

Using the boundary integral method, we break down the components acting on the lateral migration of the cell into those induced by the wall and by the curvature of an applied Poiseuille flow. By simulating a cell suspended in an infinite Poiseuille flow and a near-wall Poiseuille flow, we show that the effect of the wall is dominant even when the cell is placed far from the wall. Thus, the effect of the wall can be estimated by the analytical solution for a deformable particle in a near-wall simple shear flow (1), even when the cell is suspended in a non-linear flow. The lateral velocity of the cell in an infinite Poiseuille flow is found to be proportional to the shear gradient. Thus, using these relations, we can estimate the relative effects of the wall and the applied flow curvature on the cell lateral migration. Then, we imagine that the cell is suspended in a slit flow in which the opposing wall is sufficiently far such that its effect on the cell lateral migration can be neglected. Then, the ratio of the effect of the flow curvature to the wall can be rewritten in terms of two variables: the non-dimensional distance between the wall and cell, and the non-dimensional radius of the channel (2). In other words, the relative effect of the hydrodynamic factors acting on the lateral migration of the cell is independent of the external flow profile.

【参考文献】

- (1) J.R. Smart and D.T. Leighton, Jr. Measurement of the drift of a droplet due to the presence of a plane. *Phys Fluids A* **3**, pp. 21—28.
- (2) S. Nix, Y. Imai, and T. Ishikawa. Lateral migration of a capsule in a parabolic flow. *J Biomech* (2016), in press.

微小遊泳体の流体力学的な制御機構

(東北大学大学院工学研究科) 石川 拓司

【はじめに】

微生物などの微小遊泳体は、鞭毛や繊毛などの細胞小器官を用いて推進する。こうした微生物の遊泳挙動は古くから流体力学の研究対象となっており、単体の遊泳挙動から多体干渉現象まで、多くの研究成果が報告されている。しかしながら、微小遊泳体の推進機構や制御機構に関しては未解明な点が多く残されており、生体分子モータの機能の理解や、マイクロ推進機構の工学的応用が遅れている。

本講演では、微小遊泳体の推進・制御機構に関する3つのトピックスを解説する。まず始めに、バクテリアの鞭毛に非常に小さなトレーサを付着させた際に観察される、鞭毛の歳差運動を調べる。そして、鞭毛を駆動する分子モータの基礎特性を理解するために有用な理論を示し、フック特性の解明に向けた課題を述べる。次に、繊毛虫の遊泳時に観察される重力応答を調べるため、細胞膜に作用する張力を表現できる繊毛虫モデルを提案する。そして、このモデルから予想される、繊毛虫の重力応答メカニズムを考察する。最後に、流体の剛体振動を利用した、マイクロマシンの実現可能性について検討する。

【結果と考察】

バクテリア鞭毛を駆動するトルクを細胞膜に垂直に作用させ、フックをユニバーサルジョイント、鞭毛フィラメントを剛体でモデル化することで、実験で観察された鞭毛の歳差運動を再現することに成功した⁽¹⁾。数値シミュレーションで得られた結果を再現できるシンプルな理論を用いることで、フックの曲がり角やモータトルクを予測した。一方、歳差運動が小さなトレーサを付着させた際にのみ現れる理由は不明であり、この解明にはフック特性の更なる理解が必要と考えられる。

次に、繊毛虫を弾性膜を持つカプセルとモデル化し、繊毛打による駆動力をトルクで表現した新しい繊毛虫モデルを提案した⁽²⁾。このモデルを遊泳させると細胞形状はハート形へと変形した。カルシウムのイオンチャンネルが局在する細胞前方においては、鉛直下向きに遊泳する場合に強い張力が、鉛直上向きに遊泳する場合には弱い張力が作用し、生物学の先行研究で提案された重力下の遊泳制御メカニズムと定性的な一致をみた。

最後に、流体の剛体振動を利用した、マイクロマシンの実現可能性を検討した⁽³⁾。提案するマイクロマシンは周囲流体に比べ密度の低い球と高い球をばねで連結したものであり、全体としては中性浮力を実現している。2方向から位相をずらして振動を印加することで、1ステップ当たり半径の千分の一程度のスピードで推進可能であることを示した。

【参考文献】

- (1) Shimogonya Y. et al., *Sci. Rep.* in press
- (2) Ishikawa T. et al., *P. Roy. Soc. A*, under review
- (3) Ishikawa T. & Vladimirov V. A., *J. Fluids Eng.*, **137**, 84501-1-3 (2015)

カイラルな液晶液滴のらせん運動

東大院理 山本尚貴、佐野雅己

【はじめに】

細胞や微生物の運動機構、集団運動の理解に向け、人工的な自己駆動粒子を用いた研究が注目されている。多くの自己駆動粒子は並進運動を行うように設計されているが、実際の細胞では並進運動に加え、鞭毛の回転運動や細胞体のカタチのらせん構造に起因して円運動、らせん運動のようなカイラルな運動が見られる。私達はこのようなカイラルな運動に興味を持ち、らせん運動をおこなう自己駆動液晶液滴の実験系と理論モデルを考案した。

【実験と理論モデル】

近年、Herminghaus らは臨界ミセル濃度以上の界面活性剤水溶液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おこなうことを報告している[1]。運動メカニズムに関しては、液滴表面で界面活性剤濃度の前後対称性が自発的に破れることで、表面張力勾配駆動のマランゴニ流が発生し、並進運動をおこなうという理解がなされている。

一方、コレステリック液晶 (CLC) は構成分子がカイラリティを持ち、配向場が空間的にねじれたらせん構造を示す液晶相として知られている。CLC はカイラリティをもつため、温度勾配などの外場と配向場の運動がカップルすることができ回転運動をおこなう (レーマン効果[2])。私達はこのような CLC の非平衡の性質に注目し、CLC を界面活性剤水溶液に分散させ、液滴内に発生するマランゴニ流と CLC のもつカイラルならせん配向場がカップルすることで回転流が発生し、カイラルな運動をおこなうことを期待した。その結果、CLC 液滴は界面活性剤水溶液中でらせん運動をおこなうことが分かった。

さらに液晶のらせん構造の右巻き、左巻きを反転させることで、らせん運動の右巻き、左巻きも反転することも実験的に確認しており、この結果はらせん運動は液晶のカイラリティによるものであるということを強く示唆している。

これらの実験結果をもとに、回転力をもつ変形自己駆動粒子の現象論的モデルである Tarama-Ohta model[3]の考え方を基にした「カイラルな物体の自発運動モデル」を考案し、その数値計算、理論解析をおこなった。このモデルではらせん運動以外のカイラルな運動も予測され、それらの運動に関しても、実験で観察できはじめています。本発表ではこれらの結果や、モデルを鞭毛生物などの回転力駆動の生物の運動へ適用した場合についても議論したい。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、熱心に議論、ご指導をしてくださいました太田隆夫先生、平岩徹也博士に感謝いたします。

【参考文献】

- (1) S. Herminghaus, *et al.*, *Soft Matter*, 10, 7008 (2014).
- (2) T. Yamamoto, *et al.*, *Europhys. Lett.*, 109, 46001 (2015).
- (3) M. Tarama, *et al.*, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 013A01 (2013).

細胞シートの粘弾性応答計測

(関西医大物理学教室) 影島賢巳、丸山敏朗
(関西医大薬理学講座) 赤間智也、中邨智之

【はじめに】

単一細胞レベルの厚さでミリメートルスケールの広がりを持つ細胞シートを人体外で培養する技術は、再生医療において新たなブレークスルーとなると期待されている。細胞シートは構造的にヘテロかつ階層的であり、細胞シート全体としての物性をそのまま計測することが必要であるが、極薄で繊細であるために測定が困難である。そこで、我々は細胞シートの静的および動的な力学応答を計測できる新たな装置を開発している。培養した細胞シート、およびそれより細胞を取り除いて細胞外マトリックスのみとしたシート（マトリックスシート）の2種類の試料について、ステップ応答を比較したところ、興味深い物性が次々と浮かび上がってきている¹⁾。

【結果と考察】

図1に装置の模式図を示す。直径4 mmの円形孔のある基板の上に置いたシート状の試料の中央に、直径0.8 mmの着磁性ステンレス鋼の球を置き、下方の電磁石から力学負荷を与えて、変位量を光学式変位センサーで読み取る原理である。電磁石は電圧—電流変換回路で高精度に駆動されるため、任意の波形の負荷力を与えることができる。

この装置を用いて、ヒト繊維芽細胞の細胞シートとマトリックスシートについて、力の設定値を約13 μN から約110 μN の範囲で段階的に変えながら負荷をステップ状にオンオフし、応答を解析したところ、以下のことが明らかになった。細胞シート及びマトリックス試料の両方ともに、異なる時定数を持つ2つのフォークト要素と、ほぼ瞬間的に変形する要素の3つが直列的に結合したモデルで表されることがわかった。これら3者による変形の割合を評価したところ、マトリックスシートでは、負荷力値や負荷のオン・オフの違いによる差異が少なく、純力学的な応答を呈しているのに対し、生細胞を含んだままの細胞シートでは、負荷オンの際には純弾性的に変形した成分が、オフ時には他の2つの粘弾性モードに分配されて戻る様子などが観測された。以上から考えて、3種の力学要素は完全に独立なものではなく、生細胞の負荷に対する応答としてフレキシブルに切り替えられる可能性が考えられる。

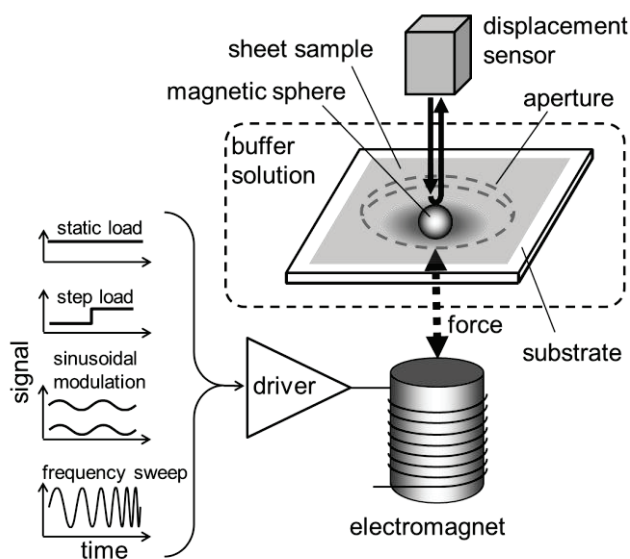


図1 装置の模式図

【参考文献】

(1) M. Kageshima, T. Maruyama, T. Akama and T. Nakamura, submitted.

A mechanical model for diversified wing margin shapes among insects

(秋田県立大学) 石本 志高

共同研究者：(京都大学 iCeMS) 杉村 薫

【はじめに】

自然界に存在する昆虫の翅は、極めて多様な形態を持ち、翅の本数やおおまかなサイズといったものの以外に普遍的な法則を見出すことは不可能なように思える。一方、比較的シンプルな翅の形に目をやると、例えばトンボ、ハチ、ハエの翅のように、外形が滑らかな美しい曲線を描いており、個々の細胞が独立に制御して到った形には到底思えない。さらにその滑らかさ故、翅脈の影響も軽微であることが推察される。実際、ショウジョウバエの翅脈が欠損した変異体を観察しても、外形に重大な異変は現れない(図1) [1]。この事実を根拠に、上述のシンプルな翅外形に対して、我々は翅縁部の曲げ剛性を主要な形態決定ファクターとする力学モデルを構築する [2]。

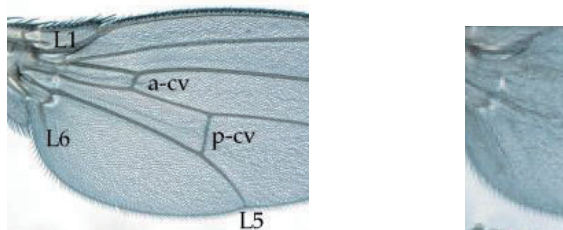


図1 ショウジョウバエの翅の形態 (左) 野生型 (右) 翅脈欠損変異体 (J. F. de Celis, 2003)

【結果と考察】

翅縁部を弾性体とし、複雑な曲げ剛性をもつ翅の縁が、ヒンジ部分によって“つままれている”力学モデルを構築し、翅の外形の美しい曲線およびその多様性を示した(図2)。他方、ショウジョウバエ囲蛹殻形成後の翅の外形が形成される段階では、翅上皮組織が集団的に移動している様子が観察されている。これより、翅内部の応力分布が張力を主要な要素としている可能性が考えられる。これに対し、翅内部の一樣張力分布が存在する場合に上記力学モデルを拡張した。次に、様々な昆虫の翅形成観測データおよび上記力学モデルを基に、翅縁部の固さ分布および内部張力の推定を試みた。

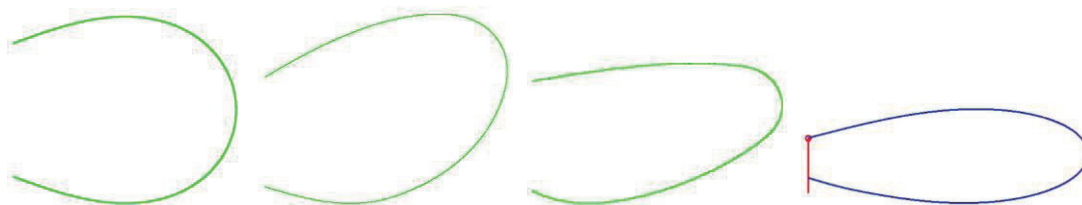


図2 多様な翅の形態シミュレーション例

【参考文献】

- (1) J. F. de Celis, BioEssays **25** (2003) 443-451.
- (2) Y. Ishimoto and K. Sugimura, to be submitted.

液晶における配向ゆらぎと流れの結合

(北大院工) 折原 宏

【はじめに】

液晶においては流れ場に加えて配向場が存在するため、これらの結合により等方性流体では見られない現象が現れ、実験および理論の両面から多くの研究がなされている。実際、流れによる配向変化およびその逆過程として配向変化による流れの生成が色々な配置で観測されている。しかし、配向と流れに関するこれまでの研究の多くは巨視的な変化を伴う場合に限られており、ミクロなゆらぎレベルでの観測例はほとんどない。我々はこれまでせん断流下において配向ゆらぎを応力の変化として測定することによって調べてきたが、今回ビデオカメラにより直接配向ゆらぎの測定を行なったのでその結果を紹介する。

【結果と考察】

まず、平衡状態においてネマチック液晶 (ZLI-2806) の配向ゆらぎと流れ速度のゆらぎに相関があることを示す。図1のように厚さ $13\mu\text{m}$ のセルに直径 $1\mu\text{m}$ のポリスチレンビーズ (中心の明るい点) を分散させてビーズの位置と配向場のゆらぎ (明暗の変化) を測定した。図1では配向ベクトル (ダイレクター) は平均して縦方向 (y 軸) を向いている。ゆらぎによるダイレクターの y 軸からの傾き角を θ とするとその y 方向への微分 $\partial\theta/\partial y$ とビーズの横方向 (x 軸) の変位 x の間には相関があることをエリクセン・レスリー理論より示すことができる。図2に相互相関関数

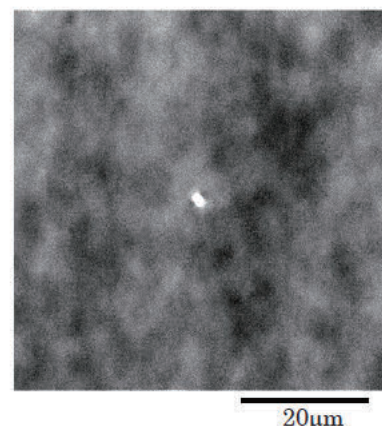


図1. 配向ゆらぎとビーズ.

$\langle (x(t) - x(0))(\partial\theta(t)/t - \partial\theta(0)/t) \rangle$ を示す。黒丸が実験値であるが、

相関があることがわかる。白丸はビーズの y 方向の変位と配向の相互相関であるが、対称性から容易に分かるようにこの場合は配向ゆらぎと速度ゆらぎに結合は現れない。なお、x 方向の変位との相関はビーズの高さにも依存することが分かった。このようにミクロなレベルでも配向ゆらぎと速度ゆらぎに結合があることを直接示すことができた。

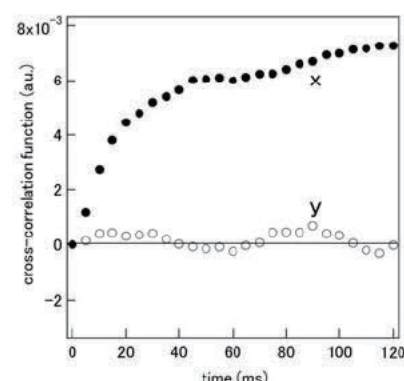


図2. 相互相関関数.

次に、非平衡配向ゆらぎの例として、しきい値電圧以下における電気対流を誘起するゆらぎおよびせん断流誘起の Pieranski-Guyon 不安定性に伴うゆらぎについても紹介する予定である。

【参考文献】

- (1) H. Orihara, F. Yang, Y. Takigami, Y. Takikawa, and Y. H. Na, Phys. Rev. E **86**, 041701 (2012).

リオトロピック液晶 II 型キュービック相の単結晶領域作成

(静岡大学 理学部・電子工学研究所) 岡俊彦

【はじめに】

リオトロピック液晶は多成分で構成され、温度とともに濃度依存的に相を変化させる。脂質などの両親媒性分子は、水などと混合することにより自己集合してリオトロピック液晶を形成する。脂質-水系でみられるリオトロピック液晶の相の中で、近年、II 型キュービック (Q_{II}) 相が注目を集めている。脂質-水系の Q_{II} 相では、無限周期極小曲面（三重周期極小曲面）の曲面上に脂質二重膜が位置している。 Q_{II} 相は本質的に周期構造をとるが、微小な結晶の集合体となりやすい。このためこれまでの基礎・応用研究は粉末結晶（多結晶試料）を用いて行われてきた。そこで私のグループでは Q_{II} 相の単結晶領域の作製に取り組んだ。試料として室温・過剰水条件でダイヤモンド型 Q_{II} 相 (Q_{II}^D 相) が安定な脂質モノオレインを用いて、有機溶媒濃度依存的な L3 相から Q_{II}^D 相への相転移を利用した簡単な作成法を開発した[1]。

【結果と考察】

モノオレインと 40%1,4-butanediol(BDO)溶液（または 20%tert-butyl alcohol）を 2:3 の比率で混合すると L3 相となる。これを内径 0.5mm の細管に 30mm 程度の長さになるように入れて一端を封じた。開放端を水に浸して一週間程度おくと、開放端に近い部分で多結晶領域ができたが、離れた場所で単結晶領域が形成された。

細管の開放端から BDO が徐々に水中に拡散してするため細管内の濃度が低下するが、開放端側から濃度勾配が形成される。またこの濃度勾配は経時的に傾きが低下していくが、L3 相と Q_{II}^D 相の構造により BDO の拡散速度が遅くなるため、濃度勾配の変化はゆっくりとしたものとなる。BDO 濃度が低下することにより L3 相から Q_{II}^D 相へ転移が起きるが、開放端に近い側では早く相転移が起き、遠いと遅くなる。また相転移後の BDO 濃度変化も、開放端に近い側では早く、遠いと遅くなる。このため BDO 濃度変化が早い開放端付近では多結晶領域となったが、遠いところでは単結晶領域が生成されたと考えられた。

これによりリオトロピック液晶 Q_{II} 相の単結晶領域を簡単に作成する方法を確立できた。ここでは脂質モノオレインを用いたが、他の物質でも作成可能と考えられる。また相転移研究での単結晶試料の利用[2]など、多くの応用研究も考えられる

【参考文献】

- [1] T. Oka and H. Hojo, Langmuir **30**, 8253 (2014).
- [2] T. Oka, Langmuir **31**, 3180 (2015); T. Oka, Langmuir **31**, 11353 (2015).

格子状に自己集合化したネマチック液晶欠陥

(北海道大学大学院工学研究院応用物理学部門) 佐々木 裕司

【はじめに】棒状分子の示すネマチック液晶相は、分子長軸が一定の方向を向いた状態であり、配向場が空間的に一様でない場合には欠陥構造を伴う。一般的に、それらはランダムな位置で観察され、時間が経つと消滅する。その一方で、電気・熱対流や薄膜状態などの特別な条件下では、規則正しい配向場のパターンが観察されることがある(1)。しかしながら、それらのパターンを同じ場所に長時間安定して保つことは難しい。その点で基板表面を微細加工し配向を制御する手法(2)は有効であるが、液晶の機能を十分に活用できているとは言い難い。我々は最近、電場によって欠陥を誘起した際に、それらが表面処理などを用いずに格子状に安定して配列するような系を見出しており、その領域拡大と機能性の理解を目指して研究を行っている。

【結果と考察】実験では負の誘電異方性をもつネマチック液晶 CCN-nm (CCN-36, CCN-37 など) にイオン性の物質 (tetrabutyl ammonium benzoate) を 1% ほど添加した試料を用いる。透明電極付ガラスに非晶性のフッ素系高分子である CYTOP (旭硝子) をスピコートしたセルを用いる。CYTOP は液晶試料に対して垂直配向を促すので、電場を印加すると、フレデリクス転移によって umbilics と呼ばれる欠陥構造が誘起される。このときに現れる格子状の組織は様々な向きを向いており、複数のドメインを作ってしまう。そこで図 1(a) のように電極を数十から数百 μm の幅の帯状にし、これらが直交するようにセルを構成する。それにより電場を四角い領域に印加した。その様子が、図 1(b) に示されている。電極の境界を利用することで全て一様なドメインを作成することが可能となった。偏光板の向きを変化させると図 1(c) のような構造をもっていることが分かる。

続いて上記の方法に加えて、我々は光ピンセットの原理を用いて局所的に配向場を操作することを試みた。レーザーが当たった領域は温度が上昇し一時的に垂直配向となることを利用することにより、任意の場所に欠陥構造を作成可能となった。

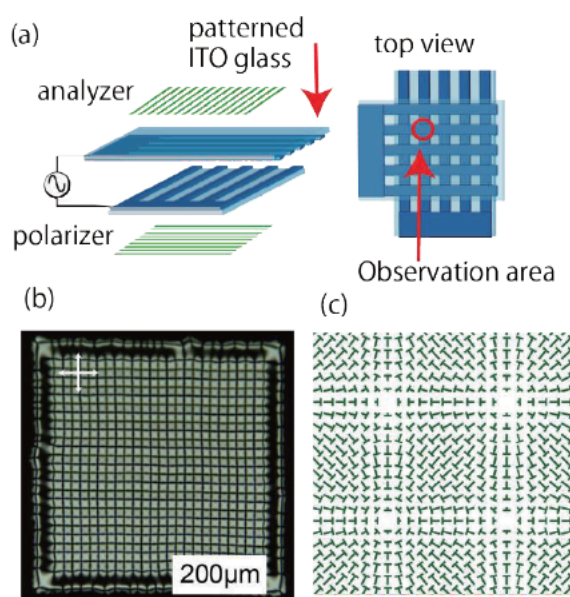


図 1 (a) 実験に使用したセルの様子 (b) 欠陥が格子状に配列したときの偏光顕微鏡画像 (c) 配向場の模式図

【参考文献】

- (1) O. D. Lavrentovich and V. M. Pergamenschchik, Phys. Rev. Lett. (1994) 73, 979, U. Delabre *et al.*, J. Phys. Chem. B (2009) 113, 3647
- (2) B. S. Murray, *et al.*, Phys. Rev. E (2014) 90, 052501

青銅比準結晶相の発見

(近大理工) 堂寺知成、別宮進一、(ステファン研究所) Primož Ziherl

【はじめに】

繰り返し単位のない独特な準周期秩序と非結晶学回転対称性は準結晶の特徴であり、これまで多種多様なソフトマター系を含む物質系で発見されてきた[1]。準周期性は2つ以上の長さスケールに特徴付けられ、それらの比は非結晶学的回転対称性に関連した無理数となっている。例えば、黄金比の10回対称ペンローズタイリング、白銀比の8回対称タイリング、白金比の12回対称タイリングが特に有名である。われわれは、デンドリマーミセルなどコアシェル系に注目し、2つの長さスケールを持つハードコア矩形ショルダーポテンシャル粒子系のシミュレーションで、3角形と2等辺3角形のモザイクからなる10回、12回、18回、24回対称のボンド配向秩序を持つ一連の2次元準結晶が形成されることを発見した[2]。本発表では、準結晶が非結晶学的回転対称性に結びついているという常識に反して、6回対称準結晶相の発見を新たに報告する。驚くべきことにこの準結晶は青銅比に結びついている。

【結果と考察】

自己相似変換 $A \rightarrow A^3B$, $B \rightarrow A$ によって青銅比列が生成される。Aの数 A_n は変換

$$\begin{pmatrix} A_{n+1} \\ A_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_n \\ A_{n-1} \end{pmatrix}$$

で与えられ、その固有方程式は $x^2 - 3x - 1 = 0$ 、固有値は青銅比 $\beta = (3 + \sqrt{13})/2 \approx 3.30278$ 、連分数で表記すれば

$$\beta = [3.3.3.\dots] = 3 + \frac{1}{3 + \frac{1}{3 + \dots}}$$

となる。この無理数に対応する正多角形および準結晶タイルはこれまで知られていなかった。

ペンローズタイリングが黄金比の自己相似性を示すように、今回発見したタイリングは青銅比の自己相似性を示す。このタイリングは大小の正3角形と対応する辺をもつ長方形で形成される。

発表ではハードコア矩形ショルダーポテンシャル粒子系のモンテカルロシミュレーションの結果が6回対称性をもち、青銅比準結晶のランダムタイリングになっていることを示す。

【参考文献】

- (1) 堂寺知成、固体物理 **48**, 331 (2013); T. Dotera, Isr. J. Chem., **51**, 1197 (2011).
- (2) T. Dotera, T. Oshiro & P. Ziherl, Nature, **506**, 208-211 (2014).

物理、ソフトマターにおける 3D プリンターの活用

(山形大学) 牧野真人

【はじめに】

3 次元の物体を印刷する 3D プリンターは、さまざまな機種が、さまざまな用途に使われている。ホビーとしての目的や、化学の分子模型などの利用など幅広い。本発表では、3D プリンターの簡単な紹介をしてから、山形大学での利用状況を説明し、3D プリンターを利用した物理、ソフトマターの問題への適用例を紹介する。

【結果と考察】

逆立ちコマは、球状で、球の中心の位置と、重心の位置とが異なり、回転に伴い、重心を高くするように逆立ちをする。この振る舞いに関して、高校生とともに、3D プリンターでコマを出力して調べた。重心の位置に応じて逆立ちの有無が変わることから、粘土を入れるなどして、重心の位置を変えて調べた(図 1)。また 3D プリンター出力用の STL ファイルと呼ばれる 3D データから、コマの重心位置と慣性モーメントを出力するソフトウェアを開発し、理論との比較を行った。

異種の高分子が混じった系では、マイクロ相分離を計算する OCTA の SUSHI のデータからダブルジャイロイドを印刷した(図 2)。このダブルジャイロイドを柔らかい材料に変更して印刷を行い、圧縮試験を行う研究も進めている。

また、液滴の内外の粘度比 λ とキャピラリー数 Ca に関してせん断下の液滴を OpenFOAM でシミュレーションし、その結果を印刷した(図 3)。これらから、多成分系のソフトマターの様子を見る教材として有効と考えられる。

動脈瘤のある血管では、血管の破裂の予測や破裂を防ぐコイルの効果を調べるため、流体シミュレーションが行われている。格子ボルツマン法で血管を流れる血液のシミュレーションを行い、血管の表面応力を計算し、そのシミュレーション結果を印刷ことも行っている。

他にも、研究や大学の活動で、3D プリンターは活躍している。さまざまなトピックスを紹介したいと思う。さまざまな発想で、3D プリンターは多方面への利用が考えられると思う。この発表が、新しい利用方法の助けになることを期待する。



図 1. 逆立ちコマ。粘土を入れて、重心位置を調整した。

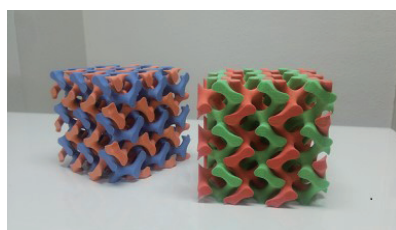


図 2. ミクロ層分離構造「ダブルジャイロイド」。フルカラーの 3D プリンターで印刷した。

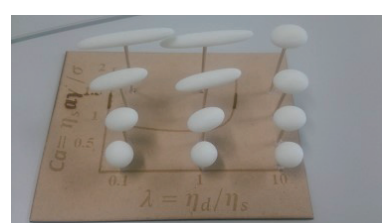


図 3. せん断下における液滴の形状。無次元化時間 $t\sigma/\eta$ $a=10$ のスナップショットを印刷した。

エキゾチックな粒子間相互作用によるコロイド構造体の形成

(九州大学・理学研究院) 木村康之

【はじめに】

コロイド粒子分散系の安定性や構造形成は基礎的および工業的に重要な課題であり、近年では、フォトニック結晶・素子への応用を視野に入れた研究が行われている。この際、粒子間相互作用として、従来は DLVO 理論で記述される van der Waals 相互作用と静電相互作用が考えられてきた。近年では、種々の方法で粒子間に異方的相互作用を導入した系における構造体形成が盛んに研究されている。本講演では、従来とは異なる粒子間相互作用を用いた 1 次元、2 次元コロイド構造体形成に関する以下のような最近の我々の成果を中心に紹介する。

【異方的粒子間相互作用を用いた構造体形成】

コロイド粒子に異方的相互作用を導入する方法として、(1)棒状、楕円体などの異方的粒子を用いる方法、(2)外場に対する応答が異なる複数種類の粒子を用いる方法、(3)結合可能な粒子数を制限した粒子（パッチ粒子）[1]を用いる方法などがある。ことに、パッチ粒子系では 2 次元系において 6 配位の最密充填構造とは異なる構造体の自己組織的な形成が可能となる。粒子表面に疎水性・親水性の 2 つの領域を有するヤヌス粒子を臨界点近傍の臨界溶液中に分散させた系において、この系の粒子間引力を温度により制御することで、平衡構造として種々のコロイドミセル構造体が形成されることを見出した[2]。

一方、コロイド粒子の分散媒質として、従来の水などの単純液体ではなく、高分子溶液や液晶などのメソスコピックサイズの内部構造を持つ複雑流体を用いた系の研究も進んでいる。例えば、分散媒質として配向秩序を有する液体であるネマチック液晶を用いた場合には、コロイド粒子添加により液晶に弾性ひずみが誘起され、このひずみを最小にするために粒子間に異方的な相互作用が誘起される。この相互作用は双極子あるいは四重極子的であり、これを用いて我々は非等方的・低充填率の構造体を自己組織的方法および光ピンセットによる粒子操作により実現可能である[3]。

【流体相互作用を用いた動的構造体形成】

従来の平衡系における構造体形成とは別に、非平衡状態において、コロイド粒子、微生物、自動車に至るまで、様々な空間スケール・相互作用により動的な構造体が自発的に形成されることが知られており、アクティブマターの重要な研究分野となっている。円環状の 1 次元軌道上を一定の駆動力を受けて運動するコロイド粒子多体系において、流体相互作用により動的なクラスタおよび結晶状の構造が自発的に形成されることを明らかにした[4]。

【参考文献】

- (1) S. Sacanna and D. J. Pines, *Curr. Opin. Col. Int. Sci.* **16**, 96 (2011).
- (2) Y. Iwashita and Y. Kimura, *Soft Matter* **9**, 10694 (2013); 岩下, 木村, 日本物理学会誌, **69**, 213 (2014).
- (3) K. Izaki and Y. Kimura, *Phys. Rev. E* **87**, 062507 (2013); Y. Kimura and K. Izaki, *Proc. SPIE*, **9164**, 9164O (2014); Y. Tamura and Y. Kimura, submitted.
- (4) Y. Sassa, *et al.* *Phys. Rev. E* **85**, 061402 (2012); S. Okubo, *et al.* *Phys. Rev. E* **92**, 032303 (2015).