

A01 運動方向への有色ノイズによって起こるアクティブマターの群れ運動

北陸先端大学院大学マテリアルサイエンス研究科 永井 健

Vicsek モデルをはじめとした対称性のみを考慮した抽象的な数理モデルの解析によって短距離の運動方向に関する相互作用を持った自走粒子集団中の普遍則が明らかになってきている。例えば粒子の相互作用の対称性で決まる秩序層への相転移や、ジャイアントナンバーフラクチュエーションと呼ばれる秩序相に存在する異常な密度ゆらぎなどである。現実世界でも加振した粉体やミオシンに駆動されてガラス面上を運動するアクチンの集団運動中にこれらの性質が確認されている。また Vicsek モデルに類似の数理モデルを用いていくつかの生物集団の運動がよく再現されることが報告されており、多種多様な集団運動の横断的な理解が可能であると期待されている。

上記の研究中の数理モデルにおいて、運動方向に加わるノイズとして時間的に無相関なホワイトノイズが用いられてきた。ここで鳥などの大きな自走粒子を考えると、慣性が効くため回転速度が時間的に無相関とはなり得ない。実際、回転速度に一定の履歴を考慮した数理モデルを用いると魚や鳥の群れ運動がよく解析できることが報告されている。またマイコプラズマのガラス板上の滑走運動など、慣性が効かなくても回転速度を維持する自走粒子も知られている。このように現実世界では回転速度がしばらく維持される状況がしばしば見られるものの、回転速度の相関時間に対する自走粒子の集団運動の依存性に関する系統的研究はこれまでなかった。そのため集団運動中で回転速度の履歴が果たす役割は明らかになっていなかった。

そこで我々はまず下記の Vicsek モデルを元にした数理モデルを用いて回転速度の相関時

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i &= (\cos \theta_i, \sin \theta_i) \\ \frac{d\theta_i}{dt} &= \frac{\alpha}{N_i} \sum_{|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i| < 1} \sin[m(\theta_j - \theta_i)] + \omega_i(t) \end{aligned}$$

間を変数とした集団運動の相関を描いた。

ここで ω_i は Ornstein-Uhlenbeck 過程や $\pm \omega_0$ の値をポアソン過程で切り替えるランダム電信ノイズなどの相関時間 τ の有色ノイズである。このモデルを用い、 τ と平均密度 ρ を変化させて集団運動の変化を追った。

この結果、有限の τ によって [1] に報告した渦の六角格子だけでなく様々な集団運動が生じることが明らかになった。例えば、渦状の構造ができるが格子は組まないアクティブフォーム、一方向に揃ったパケット状の構造、ランダム状

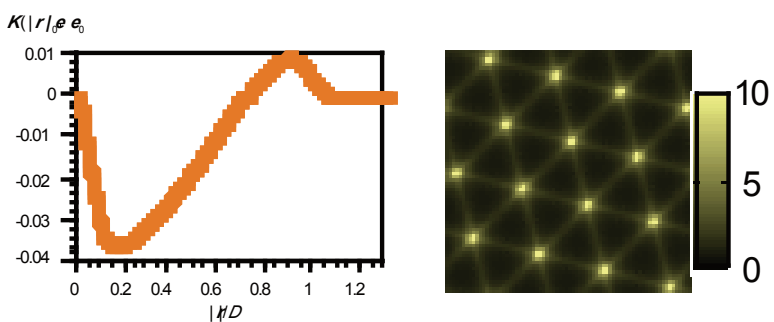


図 1: 左は $K(r)$ 、右図は定常状態での $F_i(r)+F_j(r)$ 。 $D=10$ 、 $\alpha=0.05$ で $F_i(r)+F_j(r)$ の平均値は 2。

態とネマチック状態が混ざった相などが生じる。特にネマチック相互作用しか考慮していないにもかかわらず、パケット状の様に方向の揃った相が生じることは特筆に値する。我々は更に ω_i がランダム電信ノイズで τ が大きい時の上式の連続場記述を導出し、[1]中に報告した渦の六角格子の形成メカニズムを探った。この時孤立した粒子は時計回りか反時計回りをするため、粒子の位置 \mathbf{x} と粒子の運動方向 θ の 2 変数から円軌道の中心位置 \mathbf{r} と粒子の運動方向 θ の 2 変数に変数変換できる。粒子が一回転する間の粒子の密度場の変化が小さいとすると、下記のような \mathbf{r} の密度場 $F(\mathbf{r})$ に関する連続場方程式が得られる。

$$\frac{\partial F_{\pm}}{\partial t} = -D\alpha \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \cdot F_{\pm}(\mathbf{r}) \int d\xi \mathbf{K}(\mathbf{r}-\xi) [F_{\pm}(\xi) + F_{\mp}(\xi)] + \frac{1}{\tau} \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\theta F_{\mp}(\mathbf{r} + D\mathbf{e}_{\theta}) - F_{\pm}(\mathbf{r}) \right\},$$

ここで $D=2/\omega_0$ とする。ここから回転運動と短距離のネマチック相互作用により、図 1 左のような近くにいる時は引力、離れていると斥力となる実効的な相互作用 \mathbf{K} が粒子間に働くことがわかった。図 1 右のような六角格子模様への転移点が多粒子モデルの相図中の転移点をよく再現していたため、この実効的相互作用により渦の六角格子が生じることが明らかになった。これらの結果は現在論文としてまとめ、投稿中である。

上記のような数理モデルを用いた研究により回転速度の相関時間が群れ運動の重要なパラメータの一つで有ることが明らかになった。そこで現実の系でも同様に重要なパラメータとなっていることを示すため、[1]で用いたガラス板に固定された軸索ダイニンに駆動される微小管の集団運動の相図を作成している。今回は変化させるパラメータとして、ダイニン濃度、ダイニンの種類、微小管の長さを選んだ。これまでに得られた結果として、ダイニンの密度を薄くすると[1]で報告したような渦が多数観察される集団運動からグローバルなネマチック相に転移すること、[1]で用いたダイニン c の代わりにダイニン g を用いると渦がきれいな六角格子を描くことが明らかになった。今後それぞれの条件で回転速度の相関時間を測定し、数理モデルで得られた結果と比較する。

今年度は当初の計画内容だけでなく、A03 班の濱田勉氏と共に空間の形状に対する集団運動の依存性を調べるための研究を立ち上げた。水中油滴やリポソーム上など球面上で微小管とキネシンの運動アッセイを行う。球面上ではグローバルなネマチック相などの一様な向きのオーダーは禁じられているため、平面の運動アッセイでは見られていないバンド状構造などが生じると期待される。現在アビジンとビオチンの強い吸着相互作用を用いて油滴表面にキネシンモーターの吸着を試みている。これまでにアビジンとビオチンによりガラス平面へ吸着したキネシンと微小管の運動アッセイには成功しており、来年度中に油滴上、リポソーム上での運動アッセイを実施する。

参考文献:

[1] Yutaka Sumino, Ken H. Nagai (even contribution), Yuji Shitaka, Dan Tanaka, Kenichi Yoshikawa, Hugues Chaté, Kazuhiro Oiwa, *Nature*, **483**, 448-452 (2012).