

論文内容の要旨

液晶トポロジカル欠陥の乱流ダイナミクス (Turbulent Dynamics of Topological Defects in Liquid Crystals)

東京大学 理学系研究科 物理学専攻

黒田真史

はじめに

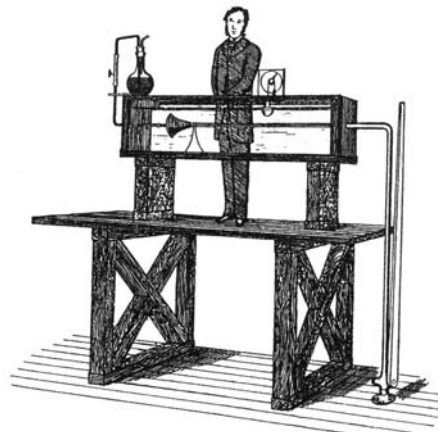


da Vinci による渦のスケッチ

乱流は、我々の身の回りいたるところで観察されるものでありながら、その複雑さは今日に至るまでやっかいなままである。Reynolds による実験から 130 年経た現在においても、完全な理解には得られていない。層流から乱流への遷移はどのように記述されるか、乱流をどのようなモデル方程式で記述したらよいか、多くの物理学者を悩ませてきた。また、化学振動や欠陥乱流など、時間的空間的に相関を失って無秩序化していく過程は、いわゆる流体以外にも種々の現象にみられるが、どのような共通点があるのか、全体像はつかめていない。

近年盛んに研究されている、超流動ヘリウムや冷却原子気体といった量子流体は、構成方程式が古典流体よりもシンプルであることから、特に乱流の雛形として非平衡統計力学の観点からも注目される。しかし古典系に比べて理想的で、有限レイノルズ数の粘性流体を記述できるのかは疑問である。

本論文で扱う液晶乱流はトポロジカル欠陥と呼ぶ分子配向秩序の特異点が粘性流体中に存在する系である。流体乱流における渦とは異なり配向欠陥そのものは運動量をもっていないが、液晶では流れとの相互作用によって配向場が乱され、欠陥が生成伸張し、衝突、組換をおこなう過程が明確に観察できる。



Reynolds のパイプフロー実験装置

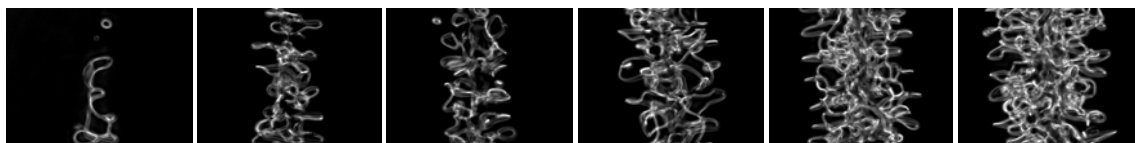
液晶系の利点は、なによりもまず実験の簡便性にあつて、室温で光学的に直接観察できること、電場による高精度な制御が可能であることから、乱流転移のダイナミクスの詳細を検証するには優れたシステムである。

欠陥乱流の生成

ガラス板の間にネマチック液晶を封入し、この中に保持したタングステン極細線に交流電流を流すとともに、セルを永久磁石による縦磁場の中において、ローレンツ力によって振動させる。図は、電流の周波数を一定として細線を振動させた場合の透過光位相差顕微鏡観察画像で、駆動電流の増加とともに明線で表される欠陥渦 (disclination) が拡がっていくことを示している。最初は、細線上のところどころに散見されるが、間もなく細線全体に拡がり、一様にまとわりついた状態になる。

欠陥が生じ始めるときの Reynolds 数 (慣性力と粘性散逸力との比) は、おおよそ 10^3 であつて、いわゆる Navier-Stokes 流体としては乱流化する状態ではないが、欠陥乱流の指標である Ericksen 数 (粘性力と弾性力との比) を考えると、 10^3 程度と求まった。また、欠陥を可視化すると同時に、異なる波長のパルス光源を用いて細線の振動振幅を観察することによって、欠陥生成とともに実効的な粘性が急峻に増大していることを見出した。これは、振動駆動が欠陥維持に必要な力に変換されたものと理解できる。

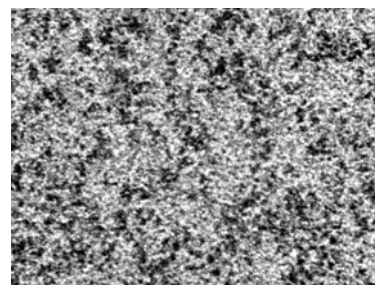
なおこの振動細線による乱流生成法は、超流動乱流においては既に同様の報告があるが、液晶における応用は本論文が初めてである。



振動細線まわりに拡がる糸状欠陥渦

また、以前から知られているように、電気対流と呼ばれる (熱対流によく似た) 運動を利用することもできる。これは液晶セルの上下面に電場を印加し、液晶分子のもつ異方性を利用して電気流体力学的不安定性を生じさせるものである。熱対流におけるのと同様に、まずロール状の構造が現れ、次第に乱雑な運動をするようになる。乱流様の状態は、光を強く散乱し濁って観察されることから、動的散乱モード (Dynamic Scattering Mode, DSM) と呼ばれ、さらに電圧をあげると、からみあつた糸状の配向欠陥を生じるようになる。

これは分子に異方性のある液晶に特徴的な相であり、DSM 2 と呼んで、配向欠陥のない DSM 1 と区別することができる。DSM 2 における配向欠陥は、閉曲線状のねじれ転傾 (twist disclination) であり、流体中あるいは流体壁面間の強いせん断力によって生成され引き伸ばされているものと考えられているが、その詳細について定量的に検証されてはいない。一方で面内に均一な乱流相を用意することができるため、統計的な振る舞いを見るのに適している。



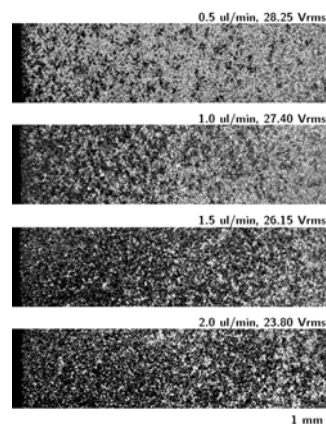
DSM 1-2 の共存状態

乱流転移の非平衡統計則

DSM 2相の密度をオーダーパラメータとしてその分布挙動を観察する。繰り込み群の考え方をを用いると、臨界点近傍においては時間、空間がスケーリングし、ひとつの普遍的な関数によって記述できると考えられる。先行研究によってなされた時間方向の緩和に加えて、本論文では新たに空間方向におけるスケーリング関係を確認した。特にベキ指数に着目することによって、いずれの場合も Directed Percolation と呼ばれる吸収状態転移の普遍的なダイナミクスに一致することが確かめられた。

臨界クエンチ実験… システム全体をすべて DSM 2 相にしておきその後急峻に電圧降下する。DSM 2 相密度の時間変化を計測して、時間方向へ緩和から臨界点を探す。

臨界フライト実験… 2次元面システムの境界壁の一辺に別の線状電極を用意して、常にこの壁で DSM 2 相が湧き出てくるように用意する。この壁からの距離方向への減衰を計測する。



臨界フライト実験

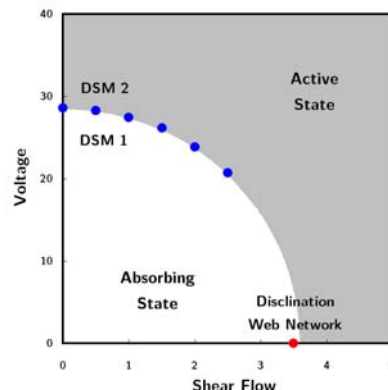
横方向流れが加わった場合の転移点電圧の降下

電気対流における乱流実験系において、液晶セルの 2次元面間に横方向のポアズイユ流れを加えることを考える。いわば、シエア流れの駆動力が対流的駆動力に対してどのように影響するのかを見る実験である。

空間一様である系では、DSM 2相のダイナミクスは横方向流れとともに動くムービングフレームで見た場合と同等で、臨界クエンチ実験における時間緩和に変化は見られなかった。ただし、DSM 1-2 転移点の電圧には定量的な変化が見られ、横方向流れの流速の 2 乗に比例して転移点が低下する。横方向流れのせん断力が、電気対流による駆動力に加算されるため、より低い電圧でも配向欠陥を維持することができると考えられる。

臨界フライト実験においても、同じ転移点電圧の降下が確認される一方で、距離方向のベキ的減衰における指数の変化が捉えられた。流れがある場合には、相関距離より相関時間のほうが支配的になることから、時間に関するベキ指数となって現れたものと考えられる。これは一般に Surface DP と呼ばれる非平衡相転移に特徴的な境界条件の問題のひとつとして認知されており、本論文ではスケーリング関係を実験的に初めて示した。

これまで対流駆動力でしか認知されていなかった液晶系での欠陥乱流の維持に関する相転移において、シエア流による駆動力が有効に寄与することを明確にした。電気対流による駆動力 V^2 に加えて、横方向流れからの乱流駆動力 v^2 が相補的に働いて、DSM 2 相の維持に寄与していることを世界で始めて計測し、2つの外力による相転移相図を描くことができた。



欠陥乱流維持の相図