

開放系における空間秩序構造の形成

東工大理 川ス保連之

熱平衡から遠く離れた非平衡開放系において、取り込むパワーがある閾値を越すとマクロな空間的秩序構造が現われる例は流体系、化学反応系、生体系などに数多く見られる。そのようなマクロな秩序構造はセミミクロな空間構造のゆらぎが種となって形成されるものであるが、セミミクロなゆらぎがどうやってマクロな構造に成長するか、そのプロセスは個々の現象によらない普遍的な問題としても興味がある。著者はこれまで、必ずしも秩序構造の形成過程に焦点を合わせて研究をしてきたわけではないが、いままで行ってきた実験のなかからこの問題に関係のある実験事実を選びだし、それに基づいて二・三気づいた事を述べたいと思う。

§1. 空間構造のコヒーレンス

まず、何をもって空間的構造の秩序度の目安とするかという問題がある。電氣的共振回路の場合のように空間的広がりをもたない系ならば、共振振幅がそのまま秩序度の目安になるが、不安定化した流体の流れや、反応拡散系のような空間的広がりをもつ系では空間の一處での流速も秩序度としたのでは不十分である。勿論、流速が0ならば秩序などは考えられないが、わきわきが流体のパターンを見て秩序だっているなと感ずるのは、流速が大きいだけでなく、流速分布の空間的コヒーレンス長が長いということである。

開放系について散逸構造の相対距離を実験的に求めるのは一般には厄介であるが、それを求めた例を示そう。密閉された管の中に少量のガスを入れ、これに直流電圧をかけると陽光柱放電が発生するが、ある条件下ではそのイオン密度が時間的ならびに空間的に周期構造をとるようになる。ガスとして例えばNeを使い、放電電流を一定に保って、Neガスの圧力を減らしてイオンの衝突確

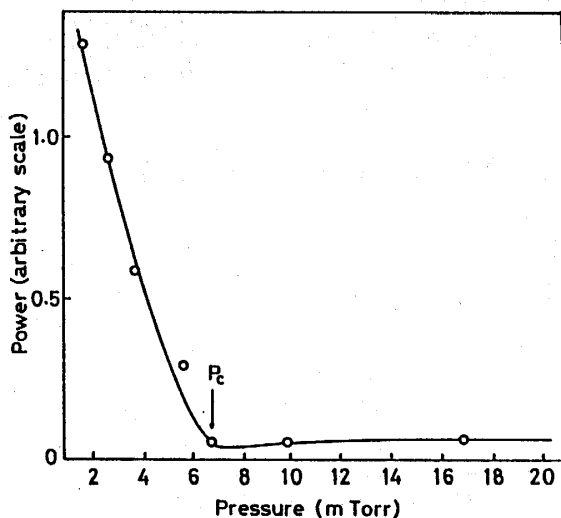


図1 陽光柱放電内のイオン密度波の強度の圧力依存性

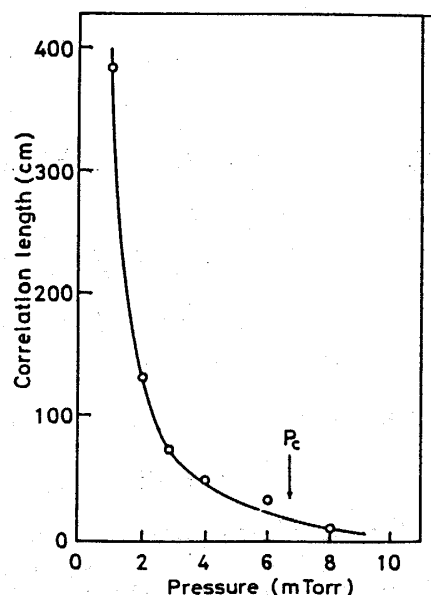


図2 イオン密度波の相対距離

率を小さくしていくとイオン密度波が成長するが、その変動成分をフォトランジスターにより光強度の変動成分として測定した結果が図1である。圧力を下げていくと6.8 m Torr あたりからイオン密度波が成長していくのが分かる。このイオン密度波について空間相関関数を測定し、その包絡線から求めた相関距離を圧力に対してプロットすると図2のように圧力の減少と共にどんどん相関距離が伸びているのが分かる。ガスの圧力を下げて衝突の確率を減らすことは損失を少なくすることであって、イオンプラズマの側から見ると単位時間当り注入されるエネルギーが増加したことになるから、この場合注入パワーの増加と共に空間構造の秩序化が進んでいる。

一般には注入パワーの増加と共にひとまず空間構造の秩序化が進み、さらにパワーをいやすと逆にカオティックな乱流状態に移行するのだが、開放系における散逸構造に共通した現象のようである。しかし管内乱流のように秩序構造を経ずにいきなり乱流が現われる場合もある。このように同じ自励状態でも空間的秩序構造を維持する状態と乱流状態があるのは、気体にくらべて密度の高い凝縮状態に秩序だった固相の状態とランダムな液相の状態があるのと似ているとも云える。

§2. 空間的秩序構造の形成過程

環境パラメータを段階的に変えることによって開放系を自励状態に移し、その間の秩序構造への発展過程を見る事は今回の研究会の主要テーマの一つであろう。ここでは液晶を使ってそれを調べた実験結果¹⁾を示す。ネマティック液晶の薄い層(40μ程度)にある閾値以上の交流電界をかけるとロール状の運動が生じ、これによって屈折率が空間的に変調されるため、これを透過光を使って顕微鏡で観察すると図3(f)に示すような Williams domain と呼ばれる縞状の構造が現われる。いま印加電圧を段階的に変えて Williams domain が成長する過程と時間を追って写真に撮ったのが図3(a)~(f)である。そこで秩序度の時間発展を定量的に見るために、このような画像の中のある場所を選び、縞模様の最も明るい位置と最も暗い位置での光の強度差が時間と共にどう成長するかを測定した。その成長の道筋はやるたびに毎に違ってくるが、これを200回繰り返して確率密度関数の時間発展をプロットすると図4が得

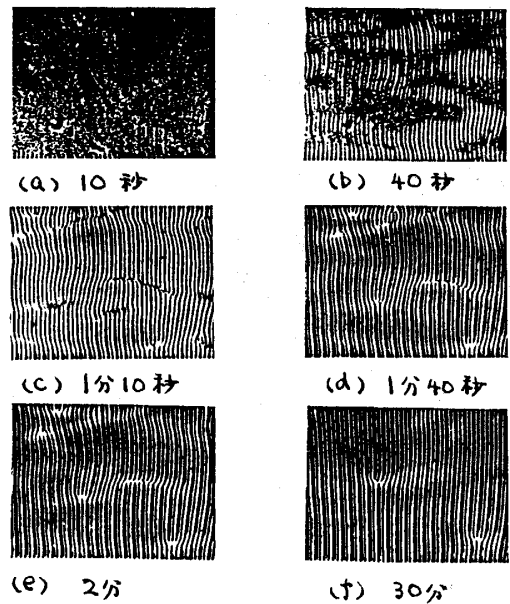


図3 (ネマティック液晶の) Williams domain の成長過程

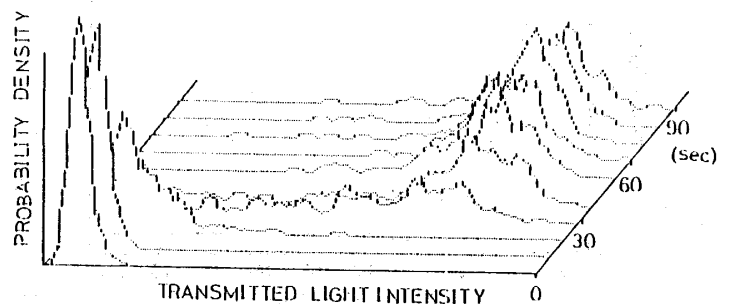


図4 Williams domain の成長過程における秩序度の確率密度関数の時間発展

られる。20~30 secのあたりで確率密度関数が非常に幅広くなるのは、このあたりの時間での道筋がやるたびに毎に極度に違っている事を意味していて、初期状態と終状態ではやはり比較的小さい。

この確率密度関数の時間発展のデータから秩序度の平均値の時間発展とそのまわりの分散の時間変化を求めたものが図5の結果である。中間地帯でゆらぎの増加がどうして起きるのか。鈴木増雄氏の理論によれば、秩序度がいつ成長するかはスイッチオンした時点でのゆらぎの大きさに左右され、それが大きければ早く立ち上り、小さければ立ち上りがおそくなる。したがって中間地帯でのゆらぎの増大は初期値のゆらぎによる立ち上り時間のゆらぎの結果現われるものであると考えることもできる。この事は今後の問題として、マクロな秩序度の成長の立ち上り時間の測定から、成長の種となっているセミマイクロなゆらぎの大きさを求める事ができる可能性を示唆している。

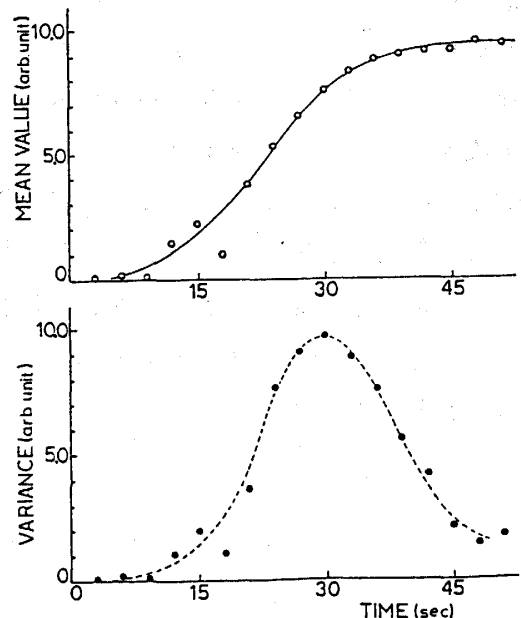


図5 Williams domainの成長過程における秩序度の平均値と分散の時間変化

§3. 秩序構造成長の種であるゆらぎの原因と性質

マクロな秩序構造はセミマイクロなゆらぎが種となって成長するものと想像される。ここでセミマイクロという言葉を使う理由は、例えば液体の場合種になるゆらぎは水分子1個1個の熱運動ほどマイクロなものであるのではなくてある程度塊った集団のランダムな運動であるが、さりとてマクロな流れから見るとそのコヒーレンス長は数桁も小さいスケールのもので想像しているからである。こう想像する根拠は、半導体や金属薄膜に電流を流すことによって発生する電流雑音は、電流を流さなくても現われるタイキスト雑音にくらべてずっと大きく、電流や物質流を絶えず取り込む開放系ではそのようなセミマイクロなゆらぎが必然的に発生すると考えるからである。物が流れると何故熱運動よりもずっと大きなゆらぎが発生するのか。それは多分境界の効果であると思われる。

そこで境界の効果をも大きくしてマクロと云えるほど大きな流速ゆらぎを起こさせ、その分散を測定した³⁾。図6に示すような水路に水を循環させ、その水路の途中に円柱を立て、その背後に乱れを作る。この乱れは下流ではやがてカルマン渦に成長するが、カルマン渦に成長する前の状態での流速ゆらぎをレーザー流

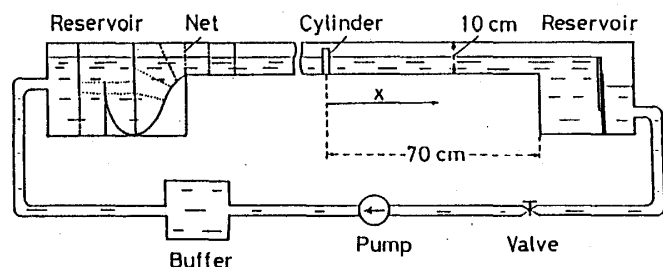


図6 流速ゆらぎ測定のための水路

速計で測定した。流速ゆらぎの分散を流れのない円柱より上流で測った平均流速 U の2乗の関数としてプロットしたのが図7である。円柱の後方 15 cm と 27 cm の位置でのデータであるが、いずれも分散は U^2 に比例している。これは半導体等における電流雑音の分散が流す電流の2乗に比例するという事実に対応しており、一般にエネルギーを取り込む開放系では必然的にその取り込むパワーに比例するゆらぎを伴うのではないかと考えられる。

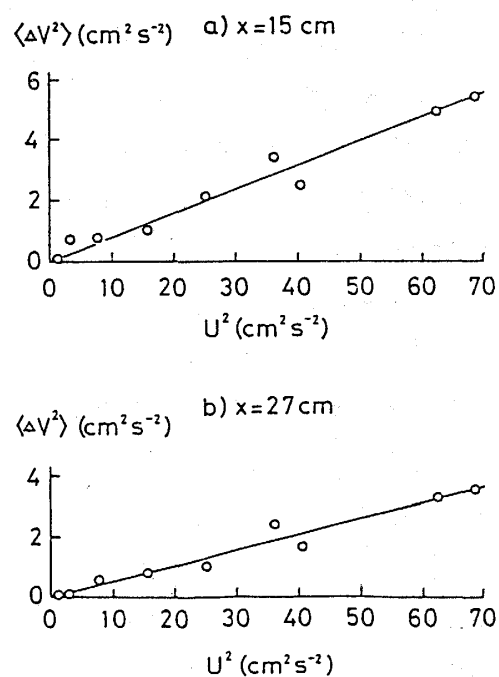


図7 流速ゆらぎの分散。 U は上流での平均流速

参考文献

- 1) Y. Tsuchiya and S. Horie : submitted to J. Phys. Soc. Japan.
- 2) M. Suzuki : Adv. Chem. Phys. 46 (1981) 195.
- 3) T. Kawakubo, T. Munata and Y. Tsuchiya : J. Phys. Soc. Japan 52 (1983) 355.