

氏名	嘉藤 徹
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成3年12月11日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 （博士課程）電子工学専攻
学位論文題目	円環セル対流構造における秩序と乱れの局在性
指導教官	東北大学教授 澤田 康次
論文審査委員	東北大学教授 澤田 康次 東北大学教授 佐藤 徳芳 東北大学教授 内田 龍男 東北大学助教授 佐野 雅己

論文内容要旨

エネルギー，あるいは物質の流れが定常的に存在する流体系では非平衡度の増大に応じて規則的構造が発生しその後，次第に構造が複雑化し最終的には乱流になる。空間的自由度の大きい系では規則的構造が局在する場合や乱れが局在，不様性を示す場合がある。

これらの現象はプラズマ，化学反応系，あるいは生体系等を代表とする非常に広範囲な分野で観測されている。全く異なる様々な分野で現象が普遍的に存在することはこれらの現象がそれぞれの系の性質にはあまり依存しないことを意味している。これらの現象を支配している規則性を見出すことは非平衡現象を理解する上で意義の深いことと考えられる。

近年，非平衡系で発生する乱れは系の空間的自由度が小さく空間のコヒーレンスがある場合，カオスとなることが判明している。多くの研究の結果，カオスへ至るルート，カオス状態の統計性についての解明が進んでいる。また空間的自由度が大きい場合は振動や乱れが局在，不様を示すことは液晶系や Benard 対流に対する研究などで明らかにされている。しかしながら局在の機構，乱れの統計性等の解明は未解決であった。近年では時間空間に対し乱れが間欠的に発生する現象 (spatio-temporal intermittency) 等も報告されこの分野の研究はますます活発化している。

一方，秩序の局在は乱れの局在に比べてまれな現象ではあるが液晶系あるいは二成分混合系の振動対流の局在現象が報告されている。これらの問題点は，なぜ均一な系で境界が発生しそれが安定に存在できるのかということである。

これらの問題を解明するにあたってはできるだけ簡単でかつ秩序状態または振動，乱れが局在す

る系を研究する必要がある。本研究ではこのような系として Benard 対流系を選び、対流セルの側壁の影響をなくし流体に本質的な現象を得るために 1 次元的に大アスペクト比の円環セルを用いた。そして秩序の局在について物質輸送を調べることで二成分混合系の局在進行波の安定に存在する原因を解明することを試みた。また振動、乱れの局在については heptan の Benard 対流について実験を行い、振動、乱れの局在現象の解明を計った。

本論文の各章の要旨について以下に示す。

第 1 章では本研究の目的と本論文の構成を述べる。

第 2 章ではまず流体系で発生する動的秩序について秩序構造が時間的に定常な場合と振動を伴う場合を示し、その後、秩序構造に発生する乱れについて現在までに示されている理論的取扱と過去に報告された乱れの形態を空間自由度の広がりに対応させてまとめ、最後に未解明の問題点を挙げ、本研究課題を取り上げた動機と本研究の特徴を示す。

第 3 章では動的秩序の局在化現象を示す対象として二成分混合系で発生する局在進行波対流を取り上げ、局在対流が安定に存在する原因を解明することを目的とした。

最初に二成分混合系研究の歴史的背景と特徴を概説し、次に本研究で用いた実験装置、光感受性色素とその製法、及び実験方法について解説する。

進行波の局在に関しては側壁による反射波と元の進行波との干渉による現象論的解析が行われている。しかし円環状セルを用いた実験でも進行波の局在が発見されており、この発生機構は反射波では説明がつかないものである。この局在現象の本質は非平衡系に内在する自己組織化現象の 1 つである可能性がある。本研究ではこの点に注目して局在の機構を解明すべく実験を行った。

振動対流の発生は亜臨界型分岐によって記述されるため分岐理論の範囲では熱伝導状態と振動状態の両方が安定に存在できる Rayleigh 数の領域が存在する。しかし空間の広がり性を考慮すると対流と熱伝導領域の境界は対流により常に揺動かされている。それにも関わらず熱伝導状態が安定なことは分岐理論だけでは説明がつかない。そこで局在進行対流と外部の熱伝導状態との間でなんらかの物質輸送が存在しその結果、境界が安定に存在している可能性を考え局在進行対流状態の局在進行対流内部、境界、それと境界近傍の熱伝導状態の領域での過渡的な物質輸送、定常的な物質輸送の有無を光感受性色素である Marachite Green Bisulphite を用いて流れを可視化することによって測定した。

次に定常状態、過渡状態での実験結果を示す。

定常状態では局在対流内部、熱伝導領域内部、及び局在対流と熱伝導領域境界付近について色素の動きにより輸送の有無を調べた。これにより局在対流内部では進行波による物質輸送を観測したが熱伝導領域、熱伝導領域と局在対流領域境界にまたがる流れは存在しなかった。

一方、系の制御パラメータである Rayleigh 数を急激に上昇させることにより発生させた過渡状態に対する測定では進行波の境界前面に過渡的な物質の流れが発見された。

この実験結果から、局在対流を安定化させる機構として過渡的にエタノールの流れが発生し系の濃度に関するコントロールパラメータであるセパレーション レシオが空間的に不様化する可能性を提案し、同時に今までに局在現象を説明するために提案されているモデルと実験結果との対応

を述べた。

第4章では Benard 対流系で発生する乱れの局在現象を理解するために行った実験について述べる。

第2章で述べたように系が小さく流体の運動が空間的コヒーレンスを失わない場合、少なくとも乱れの発生点の近傍では系は低次元の力学系として扱うことができ乱れはカオスとして理解できる。一方、空間的コヒーレンスが失われるような自由度の大きな系では流体は局所的な対流構造とこれらを空間的に結ぶ欠陥から構成される。近年では大自由度系に対しては液晶を用いた対流系が研究され、欠陥の動力学、欠陥の分布の統計性等に対する理解が深まっている。また系に発生する協同現象として特異的パターンの伝搬現象等の興味深い報告がなされている。

これらの研究に対し本章で報告する実験はむしろ少数自由度の系の延長として空間的コヒーレンスがわずかに破れることができる場合に発生する乱れ現象の解明を目指すものである。

本章では研究の歴史的背景を述べた後、実験系、測定方法及びデータ解析の方法を述べ、最後に得られた結果について波数変調、乱れの複雑さと局在の関係を中心に考察を行う。

佐藤らの実験(参考文献)をおもに念頭におきそれよりアスペクト比を大きくし、(15)に対し本系27.1) また側壁の影響をなくして流体系本来の性質を理解するために円環セルを採用して振動や乱れの局在の機構を調べるために Benard セルで局在状態の測定を行った。さらに高 Rayleigh 数を実現するために作業流体としては heptane を用いた。

測定にあたっては特徴的な時間空間的尺度を多数持つ複雑な運動を効率よく調べるために三種類の時間空間的尺度の異なる測定を行った。すなわち対流の基本的な振動周期がおおよそ10秒であること。上下方向の温度拡散時間が約10分であること。さらに流体のアトラクター次元の計算のために数時間にわたる時系列データが必要なことを考慮して次のような測定をおこなった。

1. 基本的な振動周期に対応する時空間構造の測定より
 - (1) 空間構造の位相とそれに伴う局所波数の空間変調の測定
 - (2) 波数の度数分布の測定
 - (3) 振動振幅の空間分布の測定
2. 温度拡散時間程度の時間スケールにおける空間構造の変化の測定
3. 局所的な時系列信号より時間振動の複雑さを代表するアトラクター相関次元の空間依存性の測定

これらより得られた結果は以下のとおりである。

1. 相対 Rayleigh 数 r の増大に対しまず対流に時間的振動が発生し、 $r=50$ 付近で空間構造の位相変調が発生する。空間構造の位相変調の発生後は、時間振動強度は位相勾配の大きい場所で大きく、振動のアトラクター次元も一般に高い傾向にある。このことは空間構造の変調と時間振動特性の間に関係が存在することを判明させたものである。
2. この空間構造の変調の結果、 $r=90$ 付近での対流セルの対消滅を経て波数の選択が行われ $r=160$ 付近で位相変調はなくなり対流構造は均一化する。

第5章は本研究で得られた結果のまとめである。

審査結果の要旨

非線形系を平衡状態から遠ざけるに従い、系は動的構造の自己組織、その時間的周期運動等を経て時空間的に複雑化の度合を増す。空間自由度の小さい場合、その複雑さの中には新しい規則が存在すること、更に制御パラメータの増大に伴う複雑さの変化には普遍性が存在することが最近の研究で明らかにされた。しかしながら空間的に広がりを持つ大自由度非線形系の振舞いについては研究の歴史が浅く未知の問題が多い。

著者は、境界の影響を避けるため一貫して円環状セルを用いて非線形非平衡系の代表とされる熱対流現象における動的秩序とその乱れの局在性に関する研究を行った。本論文はこれらの成果をまとめたもので全編5章よりなる。

第1章は序論であり本研究の目的と論文の構成について述べている。第2章では本研究に至るまでの歴史的経緯と本研究の動機について述べている。

第3章では、エタノール水溶液等、2成分混合系においては局在対流構造が存在することが知られていたが、その局在秩序の安定化機構を明らかにするために行った研究結果について述べている。流体の運動を可視化するためにエタノール水溶液に溶ける光感受性色素である亜硫酸水素マラカイト緑を開発して局在構造形成の過渡期における水とアルコールの相対運動を発見した。このことは局在対流構造の安定化機構が濃度輸送を伴うことを示したもので評価できる。

第4章では、円環状対流セル中のヘプタンの対流構造が幅広い範囲の制御パラメータに対して示す空間構造と時間振動振幅の非一様化現象をシャドウグラフ及び回転光センサによって測定した結果について述べている。秩序構造は制御パラメータである相対レイリー数 r が小さいときは空間的に均一であって振動不安定が一様に起きる。 $r=50$ 付近で波数変調が始まり、この変調に呼応して振動振幅の非一様化が生じること、更に局所時系列の振幅及びカオス次元は、局所的波数の大きい領域で大きくなっている傾向があること等を発見した。空間構造の波数変調と振動振幅の非一様化の関連を明らかにして、振動の強度分布が空間波数の大きい点を発振源として周囲を引き込む機構によることを示唆したことは評価できる。

第5章は結論である。

以上要するに、本論文は平衡から遠くはなれた非線形系が示す秩序と乱れの局在化現象を解明する新しい基礎的知見を得たもので、非線形工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。