

氏 名	那 須 野 悟
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 2 年 3 月 28 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	液晶対流を用いた大自由度系における乱れ の普遍性の研究
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 中島 康治

## 論 文 内 容 要 旨

複雑な不規則運動, すなわち乱流現象は, 自然界の中にきわめて普遍的に存在する現象であり, 液体の運動をはじめ, 化学反応系, 非線形光学系, ジョセフソン接合のような固体素子等, 様々な状況下で現れる。このような乱流現象の理解は, 物理的に重要であるばかりではなく, 様々な科学技術分野においても重要な研究課題となっているが, 長年に亘る幾多の努力にも拘らずそれは大きな未解決問題とされていた。しかし, 近年急速に発展した少数自由度力学系のカオス理論による新たなパラダイムの確立に至り, その状況は大きく変わりつつある。カオス理論は, 従来の統計理論的立場からの乱流研究とは対照的に, 複雑な運動様式の発生のメカニズムにまで立ち入ることで, 我々の『複雑さ』というものに対する認識を改めさせると共に, 複雑さを生み出すメカニズムにはある種の普遍性さえ存在することを示してみせたという点で画期的なものであった。ところが, 一般の乱流現象では, 状態の不規則変化は時間に関してだけではなく空間的不規則変化を伴っている場合が多く, そのような時空間的乱流の多彩な形態を記述するのには, 本質的に極めて多数の実効的自由度が必要となるため, 少数自由度力学系のカオス理論をそのまま適用することはできない。本研究では, 以上のような状況を踏まえ, 空間的に広がった系が示す時間的にも空間的にも複雑な振舞いを大自由度系におけるカオスとして捉え, その発生機構およびその結果生じた弱い時空乱流=時空カオスに内在する普遍的法則性の解明を目的としている。具体的には, 大自由度系の典型例のひとつとして, 非常に大きなアスペクト比 ( $\Gamma \sim 10^3$ ) を持つ液晶の電気流体力学的 (EHD) 対流

系を取り上げ、この系でどの様にして時空間的乱流状態が発生するのか、またその結果生じる乱流状態とはどのようなものなのかを実験的に調べることににより、液晶対流系に限らず、大自由度系一般が示す時空間的乱流現象の背後に潜む普遍法則を探るという方法を採用している。本論文は、その成果をまとめたもので、以下に述べるような7つの章からなる構成形式とした。

第I章は序論であり、本研究の背景及び本論文の構成について述べた。

第II章では、乱流現象を議論する際に基礎となる諸概念の整理を行った。乱流現象と一言と言っても、自然界に存在する乱流現象は実に多種多様である。そこで、本章では乱流の分類を行い、本研究の対象とする『時空カオス』の定義を与えるとともに、それに関する近年の研究を概観した。多くの場合、系の非平衡度を増していくと、乱流の発生に先立ち静的、時間的あるいは時空間的秩序構造が現れるが、このような時空パターンの出現は、普通系の対称性の破れをもたらす不安定と関係している。時空カオスとは、このような不安定を通して形成された時空秩序構造が弱く乱れた状態、つまり、完全な秩序構造は失われているがまだ特徴的時空構造は残っているような乱流状態の総称であるが、それはまた、不規則運動の機構にまで立ち入り時空乱流を理解しようとする研究立場を意味するものでもある。ところで、凝縮系の物理学や場の理論においてそうであったように、自発的対称性の破れに伴い、しばしば系内には多数のトポロジ的欠陥が現れる。そして、空間的に広がった系での時空カオスには、これらの欠陥が重要な役割を果たしていると考えられるものが多数知られており、それらは欠陥乱流と呼ばれ近年注目を集めている。このような欠陥乱流は、ネマティック液晶のEHD対流系においても見ることができ、その統計的性質等に関する知見は第IV章の後半で述べている。また、時空カオスには欠陥乱流以外にもいくつかの典型的タイプがあることが提唱されているが、後の第IV章で述べる時空カオスはそのいずれにも属さない新しいタイプの時空カオスである。

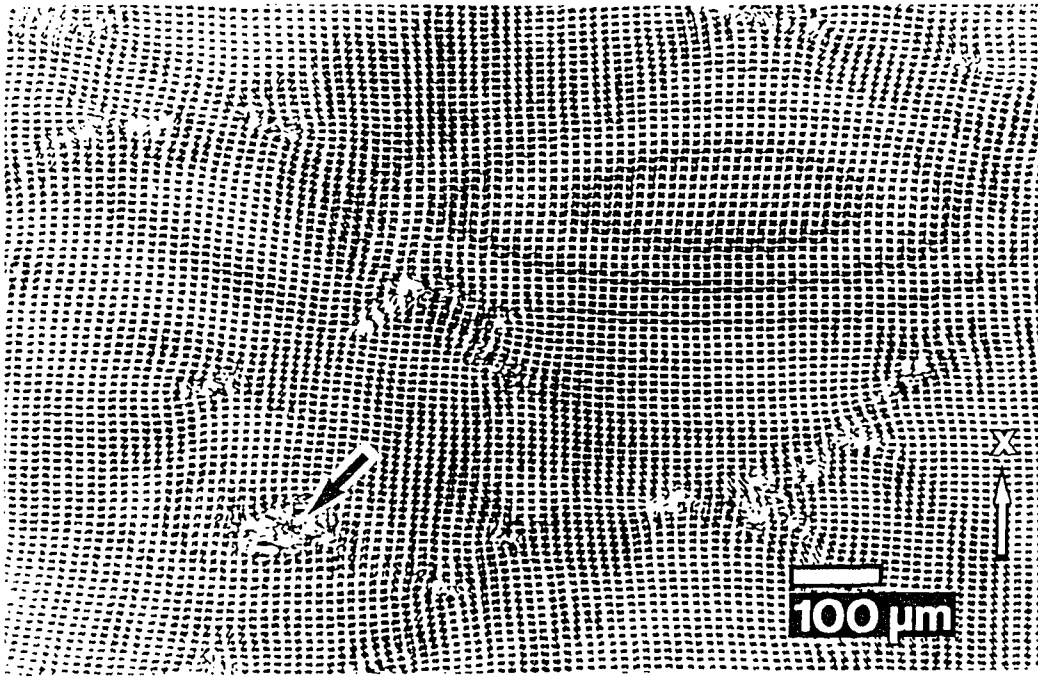
第III章では、まず、本研究で実験系として取り上げているネマティック液晶の電氣流体力学的対流系に関する基礎概念について述べた。ネマティック液晶の薄い層に外部電界を印加すると、印加電圧がある閾値 $V_c$ を越えたところで層内に巨視的な対流構造が生ずる。一般に、印加する交流電界の周波数がある閾値周波数よりも小さいときには、 $V_c$ 近傍では系固有の方向に並んだロール状の周期的対流構造が現れ、更に印加電圧を増していくと、矩型対流構造等の様々な対流構造をとりながら発達乱流へと遷移していく。これが、ネマティック液晶のEHD対流であるが、非常に大きなアスペクト比を持つ系を容易に実現できる等の大自由度系の示す乱れを研究する上での実験的利点を持っている。つぎに、一様で安定な液晶対流セルの製作方法や観測方法等の実験方法の詳細について述べた。この章の最後の部分では、この液晶対流セルに対して得られた対流相の相図を与えると同時に、各相での振舞いを概観することで以下に続く章で述べる諸現象に対する見取図を与えた。これらの相の中には、新しく発見された相も含まれている。

第IV章では、トポロジ的欠陥が主要な役割を果たしていると考えられるEHD現象に関して述べた。第II章で述べているように、空間的に大きな広がりを持つ系では、欠陥の自発的生成に伴い乱流状態が出現することが多いが、欠陥の存在は定常的乱流状態の存在を意味するとは限らない。そこで、まず第1節で、欠陥集団が形成する巨視的秩序構造に関する観測結果について述べた。つ

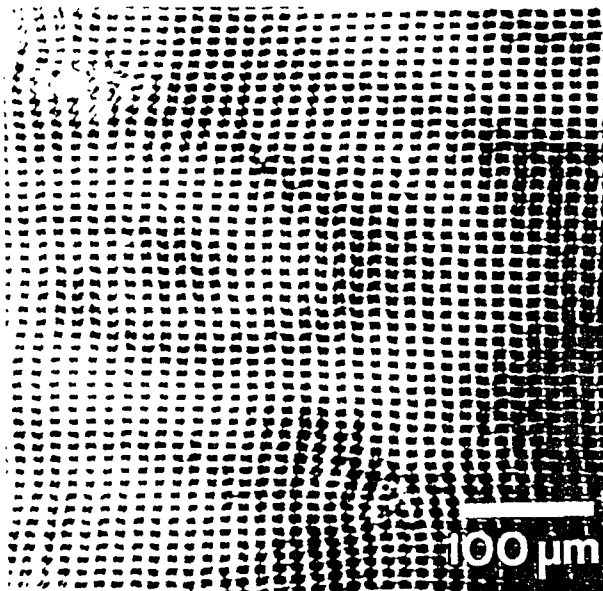
いで第2節では、これとは逆の場合、すなわち欠陥の不規則運動によって長距離秩序が失われた状態—すなわち欠陥乱流—に関する観測結果を述べた。特に、ここではその統計的性質に注目し、分岐点近傍では $1/f$ 型ノイズが現れる時空間的間欠性カオスとして振舞うことを示した。また、時空間的乱流の発生機構の理解が時空カオス研究の一つの大きな目標であるが、この節の最後の部分では、こうした欠陥乱流を力学系とのアナロジーから議論することでこの問題へのアプローチも試みた。

第V章では、トポロジー的欠陥の運動の素過程に関する研究について述べた。第IV章で述べているような欠陥乱流の物理的理解には、まず、個々の欠陥の運動の素過程を調べ、つぎに、こうして得られた知識から構築された欠陥の動力学に基づき欠陥集団の示す巨視的な振舞いを記述する統計力学を確立する、という二つの大きなステップが必要である。このような観点から、孤立欠陥の運動に関する理論的研究が近年盛んに行われているが、一方、それらの理論的結果と比較し得るようなあるいは理論研究に指針を与え得るような実験は殆ど存在していなかった。これはおもに従来の孤立欠陥の運動に関する実験では対流の初期条件を制御することが行われていなかったことによる。そこで、本研究では、初期条件が制御可能な装置を製作し、ロール構造中の孤立欠陥(転位)の運動及び欠陥間の相互作用を調べた。その結果、(i) 孤立欠陥は、理想的なパターンの波数ベクトルと実際のパターンの波数ベクトルの間のずれを表す2次元ベクトル $\Delta q$ に対して垂直方向に運動し、その速さは $|\Delta q|$ と共に大きくなること、(ii) 欠陥間の相互作用は短距離的であること、等を示した。これらの結果は、周期的ロール状対流構造が安定に存在することができるパラメータ領域での欠陥の運動に関するものであるが、系の乱れがまだ弱い欠陥乱流発生点近傍での欠陥の振舞いを理解するのにも有効であると考えられる。そこで、本章の最後の部分では、以上の結果を基に第IV章で述べているような時空間的間欠性に対する考察を行った。

第VI章では、EHD対流系において観測された波動現象とそれに伴う新しい範疇の時空カオス現象について述べた。図1に示してあるように、波動=位相波が形成する代表的なパターンには、同心円状に広がる波動が描く標的状パターンと一点を中心にして回転する波動が描く渦巻パターンの2種類がある。このような波動現象それ自体はいわゆる反応拡散系においてすでに多くの報告があるが、ここで述べている観測結果は、それらとは全く異質の系である対流系において同様の波動現象が現れるということをはじめて示したものである。しかし、この章で述べている現象の興味ある点は、別な点、すなわちその乱流的側面にある。すなわち、基本対流構造=矩型対流構造とそれよりも更に大きな空間スケールを持つ波動パターン=位相波パターンの共存、及び不規則に動き回る乱流性の格子欠陥の存在によって特徴付けられる時空カオスとしての側面である(図1参照)。ここでは、この時空カオスに関する定性的・定量的観測結果を述べるとともに、この時空カオスに対して、対称性の破れという一般的な概念を拠所とする考察を行い以下のことを示した：(i) この章で述べている時空カオス現象は、時間並進対称性と空間並進対称性が共に独立に破れていることと密接に関連していると考えられる。位相波は前者の破れに起因するものであり、基本対流構造及び格子欠陥は後者の破れに起因している。そして、格子欠陥は、位相波と基本対流構造の相互作用により生成されると考えられる。すなわち、この章で述べている時空カオス現象の記述には複数の



(a) 標的状パターン



(b) 渦巻パターン

図1 位相波が形成する典型的のパターンの例。大きなスケールでの明暗のパターンが位相波であり、細かな格子状に見える構造が矩形対流構造である。

秩序変数に関する発展方程式が必要であると結論される。(ii) 一方、これまでに研究されている時空カオスは、普通、時間・空間並進対称性が共に破れている場合であっても、本質的には一つの発展方程式によって記述されるタイプに帰着される。以上のことから、この章で述べている時空カオスは、これまでに知られていなかった新たな普遍クラスに属する時空カオスであると考えられる。

第Ⅶ章では、本研究で得られた結果の総括を行った。

## 審査結果の要旨

非線形系が平衡状態から離れるに従って、一般に時間的及び空間的な秩序構造の出現、その複雑化そして乱れへと遷移する。系が小さい場合はこれらの構造は空間的相関を保ち、時間的にのみ複雑な振舞いを示すカオスとしてこの10年間に研究が積み重ねられた。しかし、系が大きい場合、空間的相関が失われ、時間的のみならず空間的にも複雑な振舞いを示す。このような複雑さを支配する普遍法則については研究が少なく理解が乏しい状態であった。

本論文は、大自由度非線形非平衡系として比較的容易に作ることが出来る液晶電気対流系を選んで行われた秩序と乱れに関する実験的研究の成果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論であり、第2章は非線形非平衡系に関する研究の背景について述べている。

第3章は、均質な液晶対流セルの製作方法と光学的測定等の実験手段について述べている。

第4章では、液晶電気対流系における乱れに主要な役割を果たす欠陥の統計的性質について述べ、特に状態変化の臨界点近傍では時間的・空間的な長距離相関が現れることを示している。

第5章では、前章の基礎となる欠陥間の相互作用に関する研究結果について述べている。電極のパターンニングにより平行ロール状対流構造の任意の2点に欠陥を人工的に導入した後のダイナミクスから、相互作用が短距離力であることを示し、長距離相関は欠陥間の相互作用によるのではなく欠陥を生成する場に基づいていることを示唆した。

第6章では、格子状対流構造を伝搬する位相波を発見したことを述べている。この位相波はターゲット状とスパイラル状のものがあり、化学反応系に見出されたものと同種の波動が液晶対流構造にも存在することを示したことは評価される。又、化学反応系と異なってこの波動の発生源は自己形成されると共に、欠陥の生成機構と関係していることを示した。このことは、乱れの発生に対して新しいシナリオを示唆するもので高く評価される。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は液晶電気対流系を選んで、自由度の大きい系における時間的・空間的乱れについて実験的研究を行い、その普遍法則について多くの新しい知見を得たもので、電子工学・情報理工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。