

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	蛭田 佳樹
論文題目	Dynamics and subcritical transition focusing on spatially-localized turbulence in two-dimensional Kolmogorov flow (二次元コルモゴロフ流れの局在乱流に着目した動力学及び亜臨界遷移)		
(論文内容の要旨)			
<p>乱流の定量的な研究は、1883年のレイノルズによる乱流遷移の実験に始まる。レイノルズが観測した乱流層流遷移は、線形安定性の臨界点より低いレイノルズ数で起きるため、亜臨界遷移と呼ばれる。亜臨界乱流遷移は、乱流と層流解が共に安定な状況下で発生する強非線形かつ強非平衡現象で、近年まで数理物理的な取り扱いを拒む難問であり続けた。乱流は乱れた系であるため、統計力学的な扱いが主流であったが、コンピュータの発展に伴い、ナビエ・ストークス方程式を直接解くことが可能となり、乱流場の時間発展が取り扱えるようになった。この結果、少数自由度系の力学系で発展した概念や解析手法が乱流へ拡張され、数値的厳密解や位相空間の構造を用いた力学系的理解が進んだ。このような状況下、亜臨界乱流層流遷移において、空間的に局在した乱流の存在や、その生成消滅機構を素過程とする相転移現象として記述できることが明らかになりつつある。</p> <p>本学位論文では、亜臨界状態において局在した乱流のダイナミクスを直接取り扱うことで、乱流層流遷移やその機構の理解を深める研究結果がまとめられている。亜臨界遷移は、壁のある3次元流れでの研究が主流であるが、壁及びその垂直方向での強い非一様性や多重な時空スケールが共存するため、現象論的な段階にとどまっていた。蛭田氏は、参考論文において乱流層流遷移の一般的な機構を探るために、より単純な2次元ナビエ・ストークス方程式モデルを提案し、力学的かつ定量的な取り扱いができる局在乱流が存在することを示した。第1章では、以上の研究背景を基に問題設定及び基礎的な知識が鳥瞰的に述べられている。</p> <p>第2章では、局在乱流のランダムな運動に着目し、局在乱流の乱流変動を記述する内部自由度とその位置の運動モードに分解することが可能であることを示した。更に、位置の運動方向のランダムな反転が、乱流内部自由度から縮約された量によって推定できること、更に局在乱流の運動を位相空間の構造として記述できることを示した。</p> <p>第3章では、本論文で用いた2次元ナビエ・ストークス方程式モデル(拡張されたコルモゴロフ流)が、先行研究では見過ごされてきた単位流量を支配変数とすることで、亜臨界状態を実現できることを解析的に示した。更に、局在乱流の維持や生成消滅がドラッグ項(速度に線形な摩擦項)を導入することで制御できることを示した。この結果、空間領域が十分広い場合に、壁乱流系で観測された乱流層流遷移が実現されることを明らかにした。また、この乱流層流遷移が非平衡相転移の普遍クラスの一つである、有向パーコレーション遷移であることを明らかにした。以上の結果を基に、ナビエ・ストークス方程式系での有向パーコレーション遷移実現条件の検討を行い、乱流層流遷移の総括的な理解を与えた。</p> <p>第4章は学位論文全体のまとめに充てられている。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

乱流は、素粒子系から宇宙現象に至るまで広範な自然現象において実現される時空的乱雑運動である。加えて、物質やエネルギー等の輸送や混合の能力は分子運動に比べけた違いであることから、乱流研究は基礎及び応用両面から精力的に取り組まれてきた。中でも亜臨界状態での乱流層流遷移は乱流制御の基礎となるが、レイノルズ以来積年の未解決の課題であり続けている。これは乱流遷移が強非線形、強非平衡かつ時間空間的に強非一様であるために、数理物理的な解析手法が未だ不十分であることに起因する。実験技術やコンピュータの発展に伴い、大規模な領域での乱流が扱えるようになってきたために、乱流層流遷移が相転移として記述できることが明らかになりつつあるが、現象論的な段階にとどまっており、流体方程式に基づく素過程や遷移機構の解明が求められている。

本学位論文では、乱流や遷移のモデル系としてコルモゴロフにより導入され、半世紀を超えて研究された2次元コルモゴロフ流に対して、流量を支配変数とすることで亜臨界系のモデルになることを初めて示し、壁のない2次元ナビエ・ストークス方程式系で乱流層流遷移を実現した。この成果は、まさにコロンブスの卵級の発想の転換によるもので、ナビエ・ストークス方程式系において亜臨界乱流遷移に対する定量的力学系的取り扱いの先鞭をつけた先駆的研究である。

この系の特徴は、局在した乱流構造が数値的厳密解と対応していること、自己推進粒子的に振る舞い、力学系的な記述が可能であることにある。この基本的な性質を基に、ドラッグ項を導入することで、局在乱流の生成消滅を制御することを可能にした。また、複数の支配変数が導入されたために、亜臨界系と超臨界系を一括して扱える利点がある。更に、これらの手法は一般化が可能であり、多様な流体系に拡張できる。従って、今後の発展も十二分に期待される研究成果である。

主論文は71ページにわたって丁寧に書かれており、背景、結果、今後の展望が明確に表現されている。これまでに述べたように、本学位論文は亜臨界での乱流層流遷移の定量的な記述を可能にする先駆的研究であり、今後の乱流研究の進展に多大の寄与をするものと判断する。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成31年1月15日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 年 月 日以降