

論文の内容の要旨

Universal scenario of transition to turbulence as an absorbing phase transition (吸収状態転移として捉える 乱流遷移の普遍的なシナリオ)

氏名 玉井 敬一

整った流れである層流から乱流への遷移は、1883 年のレイノルズによる研究に端を発し、現在も盛んに研究されている未解決問題である。レイリー・ベナール対流のような閉じた系における時間的変動が乱雑になっていく過程は、周期倍分岐を経由してカオスに至る普遍的なシナリオに従うことが 1980 年代に明らかにされていた。しかし、パイプ流やチャネル流のような開放せん断流では、層流状態が微小な摂動に対しては安定であることが知られており、開放せん断流における乱流遷移は本質的に非線形の問題であると言える。さらに、開放せん断流では、乱流構造が空間的に局在化しており、それが減衰したり分裂や伸長によって空間内に広がったりする過程のせめぎあいになっていることが示唆されており、その意味で時間・空間両方に乱雑さを持っていることになる。では、このような流れにおいて、レイリー・ベナール対流の場合のように何らかの普遍的なシナリオがあるのだろうか。この問いに実験の立場から答えるのが本論文の目的である。より具体的には、Pomeau による、乱流への遷移が **directed percolation(DP)** 普遍クラスという吸収状態（一度入ると二度と出ていくことが出来ない状態）への転移が示す臨界現象のうちの最も基本的なものと同じ振る舞いを示す、とする予想の実験的検証である。

吸収状態と呼ばれる、一度入ると二度と出ていくことが出来ない状態への相転移は、詳細つり合いを破る点で非平衡系特有の相転移現象として統計力学で盛んに研究され

ている。開放せん断流では、線形安定性によって、一度全体が層流になると、外乱を加えない限り層流のままであるという点で吸収状態に対応することが合理的に期待される。しかし、吸収状態に対応する状態が期待出来るなら必ず DP 普遍クラスに属するかというと、少なくとも実験的にはそうではない。それどころか、素朴には DP 普遍クラスに属すると考えられる系で DP 普遍クラスに属することを明確に示した実験はこれまでに一例しか知られておらず、多くの系で DP 普遍クラスとは異なる臨界指数が報告されていた。そのため、実験で扱う（吸収状態に対応する状態をもつ）現実的な系が DP 普遍クラスに属するか否かは決して自明ではない。

本学位論文の前半では、まず吸収状態転移に関して非平衡統計力学で知られている事実や理論的手法を概観した後、確率モデルの数値計算や実験で、与えられた系の臨界指数を測定する方法に関するサーベイを記述している。その結果、両方で用いられている方法が大幅に異なっていることが判明したので、実験で用いられている方法の妥当性を数値計算によって検証した。具体的には、DP 普遍クラスの最も簡単なモデルの一つである **contact process** の定常状態を用いて、測定箇所を固定して得られる活性状態/非活性状態が交互に入れ替わる時系列、およびスナップショットを取得して得られる活性状態/非活性状態の配置に対し非活性状態の間隔の長さ分布の数値計算を行った。その結果、自然にヒストグラムをとると、観測窓の長さが有限であることに由来するバイアスが生じ、特に時間間隔分布に関してはその傾向が顕著であることが明らかになった。バイアスを除去するため、統計学で提案されていた推定手法を導入して分布を推定し直すと、現象論的なスケーリングの議論で期待されるスケーリング関係が確かに現れることを明らかにした。

後半では、実際にチャネル流を用いて、DP 普遍クラスが現れるかを検証する実験を行った結果を記述している。

実験に先立ち、活性状態が移流によって流される場合に、どのように臨界指数を測定すればよいかに関する検討を目的として、**directed percolation** モデルに活性状態の境界条件と移流の効果を取り入れたモデルを新たに導入し、**Monte—Carlo** 数値計算を行った。その結果、数値計算では、「秩序変数に付随する臨界指数 β および相関時間に付随する $\nu_{||}$ は秩序変数の活性状態境界からの距離に関する依存性から求められる」とする先行研究の結果の再現に加え、相関長に付随する臨界指数 ν_{\perp} は非活性状態の時間間隔分布の特徴的な時間を測定することで得られることを明らかにした。また、移流が無いに期待される振る舞いと移流がある場合に現れる振る舞いの間のクロスオーバーも見られることも発見した。クロスオーバーが発生する特徴的な長さなどは現象論的に議論でき、データを適切にスケールし直すと、異なる移流速度の場合のデータがひとつの普遍スケーリング関数に **collapse** するのを見ることが出来る。

先述の数値計算の結果を踏まえ、巨大な実験用チャネルを用いた実験を行った。実験用チャネルは、流れ方向に長さ 5,880 mm、スパン方向に長さ 900 mm、ギャップ幅 5 mm を持ち、先行研究に比べアスペクト比が 1 桁程度大きいものになっている。入口に導入し

たグリッドによって乱された流れは、流れの **Reynolds** 数によって減衰して最終的に層流に戻るか、あるいは局所的な乱流構造（スポット）が周囲の層流を乱流化させることによって乱流が維持される。このダイナミクスを、酸化チタンでコートされた雲母粒子を用いて可視化し、**CCD** カメラで長時間撮影を行った。画像解析を行い、乱流状態が占める時間割合をグリッドからの距離の関数として測定したり、グリッドから遠方での観測点における層流状態の時間間隔分布を測定したりすることによって、**DP** 普遍クラスの定常状態を特徴づける 3 つのすべての臨界指数を実験的に求め、そのすべてが **DP** 普遍クラスと符合することを明らかにした。さらに、前半で明らかにしたような、層流状態の時間間隔分布に関する普遍的なスケーリング仮説を実験データに適用し、異なる **Reynolds** 数で得られたデータがひとつの普遍スケーリング関数に乗ることを明らかにした。

以上の結果をまとめ、チャンネル流における層流から乱流への遷移は空間 2 次元の **DP** 普遍クラスに属することを強く示唆する実験的証拠を提示した。このことは、開放せん断流の場合であっても確かに遷移に普遍的なシナリオがあることを示唆し、さらに前半で得られた成果を踏まえると、既に実験が行われた系も含め、他の様々な系における「吸収状態転移」が **DP** 普遍クラスで定量的によく記述される可能性も示唆している。