

単純な流体系における非平衡相転移としての乱流遷移

[1] 要旨

流体運動の乱流化に関して、層流-乱流の亜臨界遷移(subcritical transition)を起こす条件、および乱流が空間的に局在する条件が、コルモゴロフ流れと呼ばれる単純な2次元流体系において、初めて壁境界が存在しない周期的境界条件のもとで理論的・数値的に明らかにされた。また、この系で観測される亜臨界遷移では、あるパラメタ範囲で、乱流の空間占有率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普遍クラスと矛盾しないことを示唆する結果が得られた。

[2] 本文

水や空気などの流体は、緩やかな流れでは乱れのない整った状態（層流状態）にある。一方で、流れが速くなると乱れが生じ予測不可能な複雑な状態（乱流状態）となる。

乱流では、層流状態に比べエネルギーの散逸が桁違いに大きく、また同時に混合が促進され、物体が受ける抵抗も著しく増大する。この乱流の特性から、層流から乱流への遷移（乱流遷移）のメカニズムを解明し、さらに流れの制御をめざす試みは、古くより理学及び工学の両方の観点から精力的に取り組まれている。乱流遷移は、流れの安定性の振る舞いにより大まかに二種に分類される。この二種の遷移は、超臨界遷移および亜臨界遷移と呼ばれる。超臨界遷移では、遷移を通して美しい流れのパターンが観測されるので、古くからパターン形成の典型として研究されてきた。熱対流を代表例とする超臨界遷移においては、駆動力を増大させ臨界を超えると層流状態が力学的に不安定化し別の安定な状態へ遷移する。一方、亜臨界遷移は、これまでパイプ中の流れを典型とする各種の壁面を境界にもつ流れにおいて、よく観測されることが知られていた。層流状態が微小な乱れに対し安定（線形安定）であると同時に、乱流状態も共存することから、加える乱れの種類や大きさの変化に応じて突然遷移が起きる。亜臨界遷移が起きるパラメタ付近では、層流状態の中に乱流状態が埋め込まれた局在乱流が観測されており、亜臨界遷移の理解に重要な役割を果たすと考えられている。

近年、国内外の研究者により、局在乱流が占める割合の時空間的变化が、非平衡統計力学における基本的な普遍クラスに属することが指摘され、大規模な数値計算や実験により検証が行われている。壁境界の影響が強い流体系では、壁乱流に特有な乱れ生成機構に由来する局在乱流と非平衡統計力学との結びつきが確認された。しかしながら、壁境界を持たない、より一般的な流れにおいては、普遍クラスに属する亜臨界遷移は観測されておらず、流体系におけるその普遍性の検証が待たれていた。この検証のためには、乱流遷移が亜臨界遷移となる条件、また局在乱流の実現条件と非平衡相転移との関連を、流体の支配方程式であるナビエーストークス方程式に基づき境界条件の影響を離れて議論する土台が必要である。

最近、京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻の研究グループは、コルモゴロフ流れと呼ばれる壁境界が存在しない周期境界の流れにおいて、層流が線形安定性を保ちつつ乱流状態を実現する条件を導き出した。また、数値シミュレーションの結果、長時間の振る舞いが非平衡相転移の基本的な普遍クラスの一つである有向パーコレーション普遍クラスと矛盾しないことを明らかにした。

周期境界における流れでは、多くの場合有限の駆動力において層流状態は線形不安定化すること

が知られている。本研究では、 (x, y) 平面内で、平均的に y 方向に流れる系（流量 U_y ）を考え、 \sin 関数的に変動する x 方向への駆動力のもとでの運動において U_y がある臨界値を超えると、層流状態が駆動力の大きさに依らず線形安定になることが理論的に示された。さらに、このようなパラメタ領域においても、局在乱流が維持されることが数値シミュレーションを用いて明らかにされた。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2020 年 4 月号に掲載された。

有向パーコレーション普遍クラスに属する臨界現象は、吸収状態（一度実現すると他の状態に遷移しない状態）が存在する系の多くでその実現が期待される。しかしながら、現実の実験系における検証例はようやく報告され始めた段階であり、普遍クラスに属する乱流遷移が実現される条件は、未だに解明されたとは言い難い状況にある。本研究では、普遍クラスに属する亜臨界乱流遷移が実現される条件が、ナビエーストークス方程式の一般的な性質に基づき解析された。今後、本研究の成果に従う実験系を構築することで、理論・実験双方が密接に結びついた現象の基礎的理解が期待される。また、亜臨界遷移や局在乱流のメカニズムについて支配方程式の観点から理解が進むことは、流体系を工学的に利用する際の指針を与えることに繋がり、更に具体的な流体系の応用に応じて、遷移の型を制御することが可能になることが期待される。

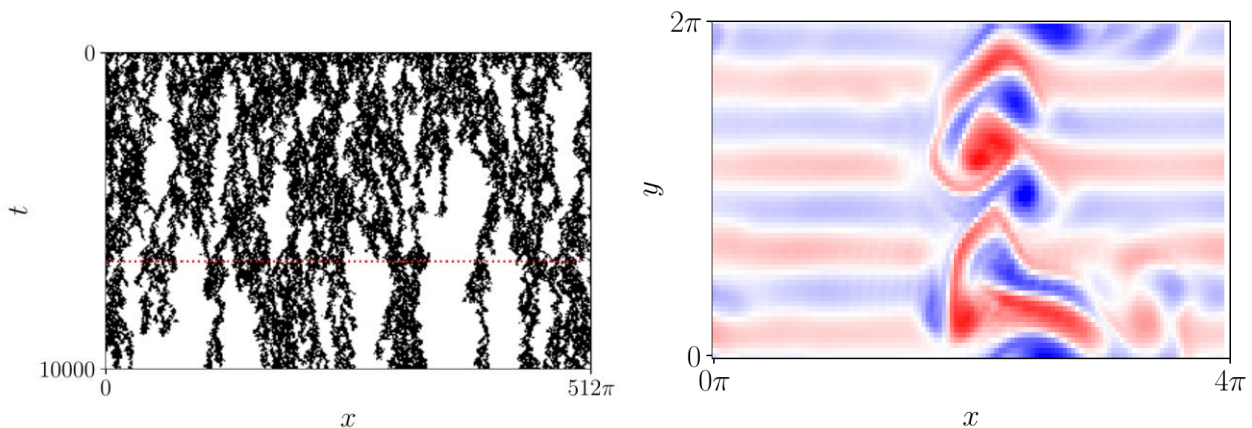


図 1。(左) 乱流領域（黒い領域、渦度の大きい場所を抽出）の時間発展。乱流領域が分裂・消滅を繰り返している。(右) 特定の時間における渦度場 ω のスナップショット（赤： $\omega > 0$ 、青： $\omega < 0$ ）。 x 方向を全体の $1/28$ だけ切り出している。強い乱れが x 方向に局在している。

原論文 (3 月 24 日公開済)

[Subcritical Laminar-Turbulence Transition as Nonequilibrium Phase Transition in Two-Dimensional Kolmogorov flow](#)

Yoshiki Hiruta and Sadayoshi Toh: *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 044402 (2002).

< 情報提供 : 蛭田佳樹 (京都大学理学研究科物理学宇宙物理学専攻 日本学術振興会特別研究員)>