

亜臨界乱流遷移レイノルズ数の評価

1. はじめに

乱流遷移現象の予測と制御は、熱流体工学における最重要課題の一つである。流れの特性は乱流遷移を経ることにより著しく変化するので、遷移流れを制御することで、流れの性質の大幅な改善、たとえば流動抵抗低減や伝熱促進などを実現することが期待される。

乱流遷移には超臨界問題と亜臨界問題とがある。超臨界遷移の問題は比較的単純であり、現象は非線形微分方程式の解の(一連の)分岐問題に帰着される。この種の遷移では、層流解からの一連の解の分岐により、層流状態が段階的に複雑化する。その代表例として、レイリー・ベナル対流やクエット・テイラー流などがある。

一方、亜臨界遷移の問題は複雑である。層流の臨界レイノルズ数より低いレイノルズ数で起こる亜臨界遷移は、有限振幅の攪乱により生じる本質的に非線形な問題であり、その理解は著しく難しくなる。亜臨界遷移では、層流状態から乱流状態へと急激に遷移が進行する。境界層流や平行平板間流れ、あるいは以下に述べる円管流といった流入流出を伴う流れは、亜臨界遷移により乱流に移行するのが一般的である。

1990年以降、この難問に対して何度かブレイクスルーがあり、2011年にはAvilaら⁽¹⁾により、円管内の層流(ハーゲン・ポアズイユ流)に関して、

亜臨界乱流遷移の起こるレイノルズ数の定義が提案され、その値の評価がなされている。本稿では、このAvilaら⁽¹⁾の成果を紹介する。

2. 円管流の遷移レイノルズ数

円管層流は、任意のレイノルズ数において無限小振幅の攪乱に対して安定であり(つまり臨界レイノルズ数が存在しない)、有限振幅攪乱を契機に乱流へと遷移する。十分に振幅の大きい攪乱を層流状態に与えれば、管断面平均流速 U と管直径 D に基づくレイノルズ数 Re が1700から2300の範囲で乱流遷移の起こることが知られている。しかし、より正確にどのレイノルズ数で乱流に遷移するのかを客観的に定義し、評価することは困難とされてきた。

乱流遷移が生じるレイノルズ数近傍では、層流状態も安定であることから、与えられた攪乱を契機に管軸方向に局在した乱れ、いわゆる乱流パフが現われる。最近の研究により個々のパフは有限の寿命しか持たず、やがては減衰することが明らかにされている。他方で、 Re が増加すると、パフは減衰する前に分裂し(図1(a))、さらに Re が増加するとパフは離散的な拡大(分裂)というよりむしろ連続的な拡大を示すようになる(図1(b))。

図2に、個々のパフが減衰するまでの平均時間(白抜き記号)および二

つ目のパフが分裂するまでの平均時間(塗りつぶし記号)を示す。 Re の増加とともに、パフ減衰までの時間は増加し、分裂までの時間は減少している。両者は $Re = 2040 \pm 10$ において一致する。このレイノルズ数においては、減衰によるパフの数の減少と分裂によるその増加とが平均的に釣り合い、乱れの統計的平衡状態が実現する。攪乱により励起された乱れは、レイノルズ数がこの値より低ければ最終的に消滅し、高ければ持続することになる。したがって、この両時間が一致するレイノルズ数が、亜臨界乱流遷移レイノルズ数を与えるものと言える。

3. おわりに

Avilaら⁽¹⁾は、局在乱れであるパフが減衰するまでの時間と分裂するまでの時間とを考慮することにより、持続的な乱れの発生するレイノルズ数を捉えた。亜臨界乱流遷移を示す境界層流や平行平板間流れなどでも、局在乱れとして乱流斑点が観測されており、斑点の減衰と拡大とを考慮することにより、円管流と同様に、今後、これらの流れでも亜臨界遷移レイノルズ数を客観的に評価できるかもしれない。

(原稿受付 2012年5月10日)

[河原源太 大阪大学]

●文献

- (1) Avila, K., Moxey, D., de Lozar, A., Avila, M., Barkley, D. and Hof, B., The Onset of Turbulence in Pipe Flow, *Science*, **333** (2011), 192-196.

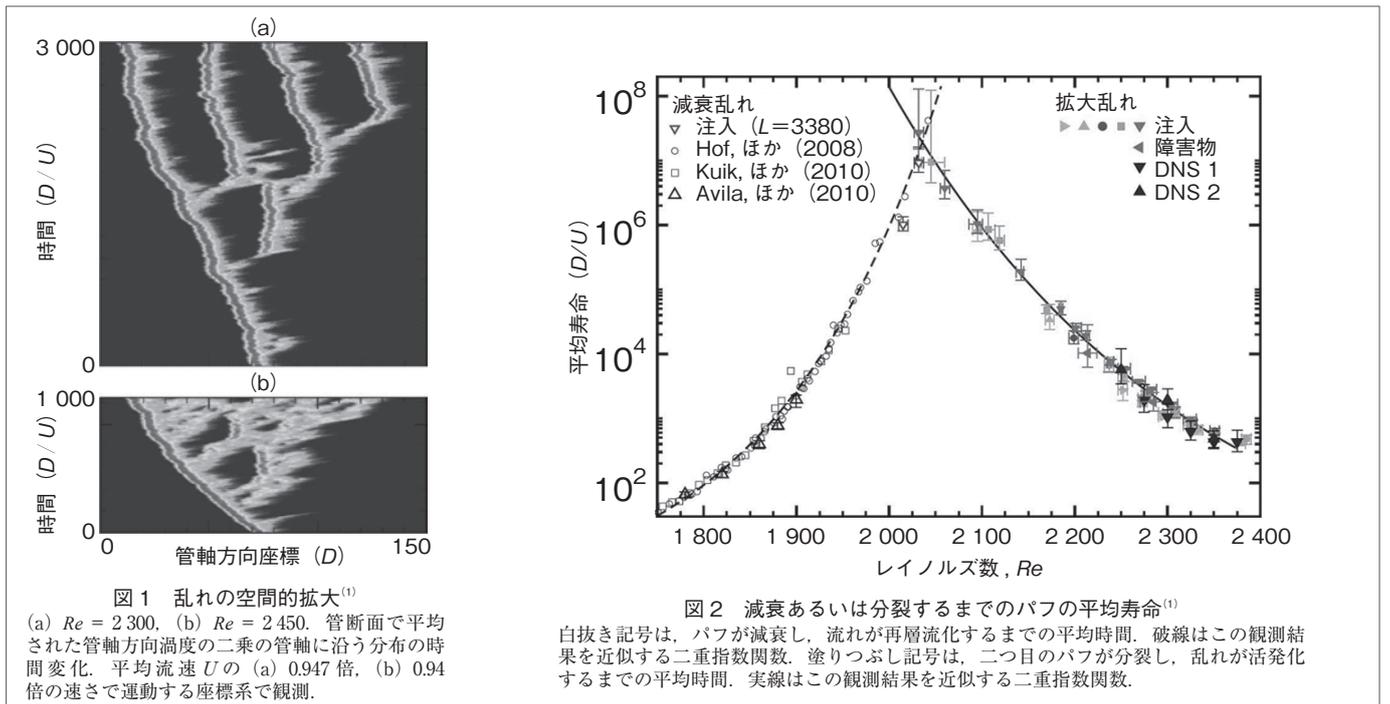


図1 乱れの空間的拡大⁽¹⁾

(a) $Re = 2300$, (b) $Re = 2450$. 管断面で平均された管軸方向過度の二乗の管軸に沿う分布の時間変化。平均流速 U の (a) 0.947倍, (b) 0.94倍の速さで運動する座標系で観測。

図2 減衰あるいは分裂するまでのパフの平均寿命⁽¹⁾

白抜き記号は、パフが減衰し、流れが再層流化するまでの平均時間。破線はこの観測結果を近似する二重指数関数。塗りつぶし記号は、二つ目のパフが分裂し、乱れが活発化するまでの平均時間。実線はこの観測結果を近似する二重指数関数。