

氏名	清水 雅樹
----	-------

(論文内容の要旨)

円管内流れにおいて、層流から乱流への遷移が起こる臨界レイノルズ数近傍では、局所的な乱流状態である乱流パフが観測される。本研究はこの乱流パフの構造とその駆動機構について直接数値シミュレーション(DNS)を用いて調べたものである。円管内流れの臨界レイノルズ数付近の研究は、有名なレイノルズ(1883)の実験に始まったもので、歴史のある研究テーマであるが、現在でも多くの研究報告がなされ活発な議論が続いている。円管流は亜臨界現象であるため、臨界レイノルズ数を確定することが難しく、遷移のメカニズムもよくわかっていない。乱流パフの乱れの生成維持過程を明らかにすることで、この遷移のメカニズムの解明に貢献することが本研究の目的である。

本論文は4章からなる。第1章は序章であり研究の背景を述べている。第2章は流れのレイノルズ数依存性について述べたもので、ハーゲン-ポアズイユ流に攪乱を加えた結果、あるレイノルズ数の範囲で乱流パフが生成された。ここでは、初期値問題として乱流パフを実現したことと、その乱流パフが生成と消滅を準周期的に繰り返すことを新しい結果として述べている。円管内流れのDNSでは、一定外力のもとで行なうか一定流速のもとで行なうかの2通りの扱いがある。これまでなされてきたDNSでは一定流速のもと、部分的な外力を初期に与えたり、高レイノルズ数での一様な乱流状態からレイノルズ数を下げることで乱流パフを実現してきた。本研究では一定外力のもと、ハーゲン・ポアズイユ流に数モードの攪乱を加えることによって乱流パフを実現した。一定流速のもとでは、同様な初期条件から乱流パフは得られなかった。一定流速の場合、初期から平均流速が小さいために、単純な攪乱では乱流遷移が起こりにくく、一定外力の場合よりも限定された適切な初期条件が必要になると考えられる。乱流パフの生成と消滅の準周期性は平均流速の増減に対応したものである。乱流パフが生成される時間帯では、層流領域の増加によって管全体の壁摩擦力が減少し、平均流速が増大していく。平均流速が大きくなると乱れの生成が活発になり、乱流パフの長さが時間とともに伸び、乱流領域の増加にともなって壁摩擦力が増大し、平均流速が減少する状況になる。管全体が乱流状態になるとレイノルズ数が小さいためにこの乱流状態は維持されず、再び層流領域が現れ乱流パフが生成される。こうしたサイクルが繰り返し見られた。

第3章は本研究の主要部分で、乱流部分の長さが保たれる平衡乱流パフ(上で述べたような生成・消滅のサイクルがない)について詳細に調べている。ここでは、乱流パフの自己維持機構について記述している。上流からやってくる速い層流と、乱流パフから上流端を横切って出てくる低速ストリークとの間の速度差によって、渦層が形成される。この渦層はケルビン-ヘルムホルツ型の不安定によって巻き上がり、攪乱が生成されることで、乱流パフが維持される。乱流パフの内部は一般的な壁乱流と同様、低速ストリークとそれに伴う流れ方向渦度が見られる。こうした乱流中の低速領域はパフの進行速度よりも遅いため、壁に沿ってパフに相対的に上流へ移動し、パフ後縁に低速ストリークを形成する。そして、上流からやってくる速い層流との間に強い速度差が生じて渦層が形成される。この渦層はケルビン・ヘルムホルツ不安定によって巻き上がり、乱れが生成される。こうした乱れが、中心軸付近をパフよりも速く下流へ移動し、パフ内部に注入されることでパフが活性化される。

第4章はDNSの方法について述べている。遷移現象の解明には高精度の計算が必要となるため、スペクトル法を採用している。円筒座標系で運動方程式を記述すると中心軸上に見かけの特異性が現れる(座標特異性)。この特異性の処理の困難が円管流れのDNSによる先行研究が少ない理由である。本研究では動径方向のスペクトル展開にゼルニケ円多項式を用いた数値コードを新たに開発し、解の解析性を自然に保証することで、高精度なDNSを可能にしたのである。

氏名	清水 雅樹
----	-------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、円管内流れにおいて乱流遷移のメカニズムの解明を目的として、臨界レイノルズ数付近の流れを直接数値シミュレーションを用いて調べたもので、主な成果は次の通りである。

[1] 円管内流れのこれまでの研究で直接数値シミュレーションによるものは数少ない。円筒座標系を用いるため、中心軸上で座標特異性が現われ、高精度な計算を困難にしているのがその理由である。本研究では、スペクトル法で動径方向の展開にゼルニケ円多項式を用いることで、中心軸上での解の解析性を保証し、上記の困難を自然に克服して、高精度な計算を実現する計算コードを新たに開発している。

[2] 従来の研究では、平均流速一定のもとで部分的な外力を与えたり、高レイノルズ数での乱流状態からレイノルズ数を下げるなどによって乱流パフが実現されてきたが、本研究では一定外力のもとでの発達した層流(ハーゲン・ポアズイユ流)に少数モードの攪乱を与えることで乱流パフを実現した。このように、初期値問題として乱流パフを実現したのは本研究が初めてである。

[3] 臨界値近傍でもやや大きいレイノルズ数では、平均流速の増減のサイクルに応じて、乱れが局所的である乱流パフの状態と管全体が乱れる状態が繰り返し現れることを発見した。

[4] 乱流パフの上流端に現れる壁面近傍の低速ストリークと円管の中心部を流れる速い層流との間に渦層が形成される。この渦層がケルビン・ヘルムホルツ不安定性によって巻き上がり、乱れが生成され乱流パフが維持されていることを明らかにした。

以上、本論文は乱流遷移現象の解明に手がかりを与えたものであり、学術上、實際上寄与するところが多い。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成21年2月3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。