

報告番号	甲 第 11475 号
------	-------------

## 主論文の要旨

論文題目 高レイノルズ数円管乱流における統計量の  
普遍性に関する実験的研究  
氏 名 和田 裕貴

### 論文内容の要旨

円管乱流は現代のエネルギー社会における流体輸送で多岐にわたって用いられている。例えば発電プラントなどでは、レイノルズ数が非常に高くなり管内流速分布や摩擦係数の解明は、安全性を確保するために重要な役割を果たす。円管乱流は工学的に極めて基本的な流れ場であるにも関わらず、その乱流統計量の普遍性は未だに明らかになっていない。統計量の普遍性を明らかにすることで、実験や数値計算で実現できない非常に高いレイノルズ数での統計量の分布型を得ることができ、乱流現象を統計的に予測することが可能となる。そのため、乱流統計量の普遍性を明らかにすることは工学的に有用である。

壁乱流における統計量の普遍性を議論するためには、内層変数である摩擦速度の算出精度が重要となる。円管流では、圧力勾配に基づいて摩擦速度が算出できることから、統計量の普遍性に関する議論に適すると判断される。乱流統計量を正確に計測するためには、小さな乱れのスケールを正確に測定できる速度計測法が必要となる。先行研究では、変動速度が空間平均される計測手法を用いていたことから、小さなスケールを正確にとらえられていなかった。そのため、変動速度が測定部で空間平均されず、流れ場を乱さない非接触流速測定法を用いる必要がある。

本論文では、高レイノルズ数円管乱流における流れ方向速度成分をレーザードップラー流速計で計測した結果に基づいて、高レイノルズ数円管乱流における統計量の普遍性を明らかにすることを目的として行った研究をまとめている。論文は全 8 章で構成され、各章の概要を以下に記し、最後に今後の展望を述べる。

第 1 章では、壁乱流のオーバーラップ領域における乱流統計量に関する研究を調査した。その中で、普遍的な性質および乱流構造の解明は工学的応用上重要であることから、壁乱流における実験的研究の必要性を示した。壁乱流における統計量の普遍性の議論にあたり、

円管乱流での LDV 計測の利点および必要性を示し、本研究の目的と論文の構成を述べた。

第 2 章では、実験結果を用いた詳細な議論を行うにあたり、流れ場および計測精度の検証を行った。流れ方向断面計測結果に基づいて、流れ場には偏流がないことを明らかにした。測定部にガラスを用いていることから、レーザーの屈折の影響を考慮することで、円管内測定座標が正確に見積もられることを確認した。流速分布を積分して得られる流量を静的秤量法によって得られた参照流量値と比較することで、流速値の測定精度が高いことを確認した。基本的な統計量が壁乱流における典型的なレイノルズ数依存性を示すことに基づいて、本計測結果が壁乱流の乱流統計量としての詳細な議論が可能であると判断した。

第 3 章では、円管乱流におけるオーバーラップ領域で成立する平均速度分布型について議論した。平均速度分布型については、先行研究が多いことから、従来示された平均速度分布型との比較を行った。その結果、これまでに提案されているどの係数の組み合わせとも一致しないことが明らかになった。そこで、本計測結果の満たす速度分布型を検証した結果、べき乗則 ( $50 < y^+ < 400$  で  $\gamma=0.145$ ,  $c=8.41$ ) と対数則 ( $y^+ > 600$  で  $\kappa=0.383$ ,  $B=4.38$ ) がそれぞれ成立することが明らかにした。係数値は異なるが、べき乗則と対数則の両立は先行研究の報告と一致することから、円管乱流の平均速度分布型の普遍性は、オーバーラップ領域においてべき乗則と対数則が両立することであると判断された。外層スケールリングである速度欠損則を適用することで、対数領域が明確に現れるレイノルズ数を調べた結果、 $Re_\tau > 6000$  の条件で対数領域が現れ始めることを明らかにした。

第 4 章では、オーバーラップ領域においてべき乗則と対数則、二つの平均速度分布型が適用できることから、高次の統計量を用いて特徴づけを行うために、乱流強度の分布型を中心に議論を行った。外層領域における乱流強度の対数直線関係の成立範囲を調べたところ、平均速度における対数領域と重なりを持ち、平均速度の対数領域の外層側に乱流強度の対数直線関係が現れることを明らかにした。乱流強度の対数直線関係の勾配値  $A_1$  はレイノルズ数とともに増加する傾向を示し、 $Re_\tau > 6000$  程度で 1.44 に漸近する傾向が確認された。乱流強度での対数直線関係の勾配値は先行研究と異なるが、対数直線関係が成立することから、高レイノルズ数円管乱流における乱流強度は対数直線関係を有することが明らかとなった。

第 5 章では、オーバーラップ領域における統計量の特徴的な分布傾向に起因する渦構造を調べるために、フーリエ変換を用いたスペクトル解析を行った。壁乱流では Attached eddy (AE) モデルと呼ばれる渦構造の理解がされており、円管乱流において AE モデルの  $-1$  乗スペクトルの成立について検証した。 $-1$  乗スペクトルを用いた乱流強度の対数直線関係の解釈が行われていることから、外層領域での乱流強度の対数直線関係の成立域のパワースペクトル分布を調べた。その結果、近似的に  $-1$  乗の関係を満たす領域が確認されるものの、その分布傾向が AE モデルにおける  $-1$  乗スペクトルとは異なることを明らかにした。以上の考察に基づき、AE モデルの  $-1$  乗スペクトルと高レイノルズ数における乱流強度の対数直線関係には関連性がないと結論づけた。

第 6 章では、オーバーラップ領域における渦構造の相似性と平均速度の特徴的な分布型との関連性の議論を行うため、確率密度関数型の不変性について調査した。確率密度関数型は壁からの距離に対して近似的に不変となる領域が存在することを示し、不変領域はオーバーラップ領域の内層側と外層側の二つ存在することを明らかにした。加えて、二つの確率密度関数の不変領域は、平均速度や偶数次モーメントおよびパワースペクトルの特徴的な分布傾向を示す領域と重なることが明らかとなり、オーバーラップ領域の内層側と外層側での統計的性質が異なる構造を有すると結論づけた。

第 7 章では前章までの結果を踏まえて、円管乱流における統計量の普遍性について考察した。特に乱流強度分布における内層ピーク値のレイノルズ数依存性、外層の第 2 ピークの存在、外層領域の対数直線関係について、本論文における見解を示した。また、壁乱流としての平均速度分布型の特徴づけとして、乱流境界層における計測結果との比較を行い、普遍的な分布型について考察した。その結果、円管乱流と乱流境界層それぞれにおいて、オーバーラップ領域ではべき乗則と対数則がそれぞれ成立する領域（成立する範囲が異なる）が存在することが明らかとなった。両流れ場における対数則の勾配はおおむね一致するが、切片が異なり、対数領域の開始点や対数領域の現れるレイノルズ数が異なることを明らかにした。それに伴い、対数領域の開始点の違いと対数則の切片の違いをオーバーラップ領域の内層側の渦構造と関連させて考察した。壁乱流のオーバーラップ領域における流れ方向速度の統計的性質はレイノルズ数の大小によって異なり、レイノルズ数が増大することで外層領域において大きなエネルギーを有する大規模構造が現れ、それらが乱流統計量の分布傾向に影響を及ぼすと結論づけた。

第 8 章では各章で得られた結果をまとめた。高レイノルズ数円管乱流に関する議論は計測データが少ないことから、本論文における考察も異なる計測データを用いて検証されるべきと考える。高レイノルズ数円管乱流における実験は試験準備段階のものが存在することから、今後さらに高いレイノルズ数での実験が行われることが予想され、より精度の高い計測データによる円管乱流における統計量の普遍性に関する研究に期待される。

本論文では、高レイノルズ数の円管乱流に関する速度分布計測結果を用いて、乱流統計量の普遍的性質および乱流構造に関するモデルの検証を行った。その中で、本計測結果の満たす統計量の分布型を示し、円管乱流における統計量の普遍性を明らかにし、壁乱流における研究課題に対して一つの見解を示した。これらの解釈の中でいくつか仮定をしていることから、その仮定に基づいたモデル分布の提案や、仮定の検証が今後進められることが必要である。