

主論文の要約

論文題目 **3方向速度成分の計測とスペクトル解析に基づく高レイノルズ数円管流れの統計的普遍性の解明**
(Study on universality of high Reynolds number pipe flow based on measurements of three velocity components and spectral analysis)

氏名 **小野 満里絵**

各種プラントから水道、ガスといった生活インフラまで多くの流れは円管を使って輸送されており、円管流れは工学的に重要な流れ場の一つである。円管流れにおける乱流現象の解明は、省エネルギー化に大きく貢献するほか、生産効率化や安全性の向上などの面からも工業界に大きく寄与すると考えられる。しかし、乱流現象は無秩序で非定常な運動であり、その複雑さゆえに、現在でも古典物理学最後の未解決問題であり続けている。

極限レイノルズ数までを想定し、レイノルズ数が増えようしても矛盾しない普遍的な規則から、複雑な乱流現象を理解しようとする試みがある。その一つとして、特定の変数で整理すれば異なるレイノルズ数の結果が重なるようなスケールリング則や、統計的性質がレイノルズ数によって記述できるレイノルズ数依存性などが挙げられる。極限レイノルズ数における結果は現実的には得られないが、高レイノルズ数流れを研究することで、乱流の普遍性についての手がかりを得ることができる。本研究では、低レイノルズ数から高レイノルズ数までの種々の乱流統計量のスケールリング則や、レイノルズ数依存性に注目することで円管流れにおける普遍性を確立することを目的として研究を行った。

本研究では、レーザードップラー流速計 (LDV) を用いて高レイノルズ数実流試験設備 (High Reynolds number actual flow facility : Hi-Reff) における円管流れを計測し、流れ方向成分の平均速度分布や3方向 (流れ方向、垂直方向、スパン方向) 成分の乱流強度、流れ方向成分のスペクトル情報を取得した。設備の概要と実験装置、各統計量の計測手法については2章にて詳細に記述した。同一の設備かつ計測機器を用いて、このように多様な統計量を幅広いレイノルズ数で計測している例は筆者が知る限りほとんどない。これまで、乱流の普遍性についての多くは、流れ方向成分の1次や2次の統計量に関して議

論が行われていたのに対し、本研究では 3 方向の結果やスペクトルの結果も含めた議論を行った。

3 章では、高精度な結果を得るために、高レイノルズ数で顕在化する計測上の問題について調査した。本研究では、1 次および 2 次の統計量に影響する問題として、LDV 測定体積内への粒子の侵入頻度、絶対値の校正、空間分解能、フリンジの歪みに関する影響について取り上げた。更に、スペクトル解析を行う際には、時間的に不等間隔なデータの取り扱いやサンプリング周波数に関する問題について考慮した。空間分解能とフリンジの歪みについては本研究で新たに、実測や物理的背景に基づく補正方法の開発と検討を行った。

4 章では、補正後の 3 方向の乱流強度分布の結果をもとに、乱流強度分布における対数領域と内層ピークのレイノルズ数依存性を調査した。対数領域は、Townsend (1976) によって提唱された Attached Eddy 仮説 (AE 仮説) から予測される、高レイノルズ数流れにおける特性の一つである。本研究では、3 方向の乱流強度分布を調べたところ、 $Re_\tau > 10000$ において異なる傾きや切片を持った 2 つの対数領域 (もしくは一定領域) が各速度成分で存在することが明らかになった。本研究ではそれぞれ、内層側の対数領域および外層側の対数領域と定義した。また、乱流強度分布における 2 つの対数領域を合わせた領域が、流れ方向平均速度分布の対数領域と一致する結果が得られた。流れ方向乱流強度分布の内層ピークの成長の仕方に関しては、対数則および漸近則の 2 つの成長が予測されていた。また、流れの幾何形状による違いについても議論がなされている。本研究結果において、流れ方向の内層ピークは不確かさの範囲で対数則および漸近則両方に一致し、先行研究の平板境界層の結果と一致する結果が得られた。このことから、流れ方向のピークの成長の仕方は、壁乱流のカノニカルな流れにおいて流れの幾何形状に依存しないことが示唆された。また、スパン方向のピークに関しても対数則および漸近則両方に一致する結果が得られた。

5 章では、3 方向の乱流強度値から、乱流運動エネルギー (Turbulent kinetic energy; TKE) を求め、TKE のスケーリング則やレイノルズ数依存性についても議論した。TKE 分布においても、3 方向の乱流強度分布と同様、2 つの対数領域が出現することが確認された。また、内層ピークのレイノルズ数依存性に関しては、流れ方向やスパン方向の乱流強度と同様、不確かさの範囲で対数および漸近則両方に一致する結果が得られた。更に、管断面積において TKE を積分してバルク TKE を求め、そのレイノルズ数依存性についても調べる新しい試みを行った。その結果、バルク TKE はレイノルズ数の上昇と共に漸近していく結果が得られた。バルク TKE の値が漸近的傾向を示したことから、局所的とはいえ乱流強度がレイノルズ数と共に増大し続けることは考えにくい。よって、種々の内層ピークに関しても対数則よりも漸近則に従うと予測した。これまで 3 方向成分の計測の難しさから、その合計値である TKE に関するデータも圧倒的に不足していた。しかし、本研究では世界初となる $Re_\tau > 10000$ の TKE の結果を報告したことで、これまであまり議論さ

れてこなかった TKE のスケーリング則やレイノルズ数依存性について新たな知見を示すことができた。

6 章では、流れ方向のスペクトル解析を行い、Very-large-scale motion (VLSM) および Large-scale motion (LSM) と呼ばれる管径の数倍～数十倍の長さを流れ方向にもつ、2 つの大規模構造に着目した。Pre-multiplied spectrum (PMS) のピークを調べたところ、エネルギー的に支配的な構造は壁近傍を除き、内層側から LSM→VLSM→LSM と変化することがわかった。また、VLSM の値自体は、レイノルズ数依存的に成長することが確認された。しかし、PMS を局所の乱流強度値で規格化した値を調べたところ、VLSM が支配的になる領域から管中心にかけては PMS の形状は幅広いレイノルズ数で保存されている、つまりレイノルズ数間で相似的事象であることが観測された。このことから、これらの領域における乱流強度のエネルギーの増大は VLSM のみによって駆動されるわけではなく、幅広いスケールのエネルギー全体が増大することを明らかにした。

7 章では、これらの統計量をもとに、円管における壁からの距離に応じた領域分けを行った。先行研究において Wosnik et al. (2000) は、円管乱流を y に方向対して粘性底層、バッファ領域、メソ領域、対数領域、後流領域の 5 層に領域分けをした。しかし、本研究においては、従来の対数領域が内層側と外層側の対数領域の 2 つに分けられることから、6 層であるとの見解を示した。内層側の対数領域内では、TKE に対する 3 方向の乱流強度の寄与率がそれぞれ一定になるのに対し、外層側の対数領域ではこのバランスは大きく崩れる。また、内層側の対数領域において、支配的な構造は VLSM で変化がないのに対し、外層側の対数領域では、支配的な構造が VLSM から LSM に領域内で変化することが明らかになった。このことから、外層側の対数領域よりも内層側の対数領域の方が、より統計的な相似性を有していると判断し、AE 仮説によって予測される対数領域としては内層側の対数領域が当てはまると結論付けた。