

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：82626

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B））

研究期間：2019～2023

課題番号：19KK0098

研究課題名（和文）高レイノルズ数円管乱流の摩擦損失係数と普適的速度分布型の確立のための国際共同研究

研究課題名（英文）International collaborative research work for friction factor and universal velocity profile in high Reynolds number pipe flow

研究代表者

古市 紀之（Furuichi, Noriyuki）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究グループ長

研究者番号：10334921

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,200,000円

研究成果の概要（和文）：高レイノルズ数円管乱流における管摩擦係数および平均速度分布の普適性を明らかにするために、ドイツPTB(Physikalisch-Technische Bundesanstalt)との国際共同研究を実施した。管摩擦係数および平均速度分布の計測の結果、両者において非常に高い一致性を得ることに成功した。この結果、円管流れにおける管摩擦係数の普適的な値と平均速度分布の普適的な分布形を明らかにすることができた。また、先行研究におけるSuperpipeの値に関して、その物理的理由がWakeにおける速度分布にあることを明らかにすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、これまでに混沌としていた高レイノルズ数円管流れにおける管摩擦係数や平均速度分布の普適性について、高精度な実験結果に基づいて明らかにすることができている。このことは、壁乱流における理論の構築や、数値計算におけるモデルの構築に対して非常に有用である。また、高レイノルズ数における普適性の存在に近づくことができたことは、学術的な意義が高いものといえる。

研究成果の概要（英文）：An international collaboration with PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Germany) was conducted to clarify the universality of the pipe friction factor and mean velocity profile in high Reynolds number pipe flow. As a result of the measurement of the pipe friction factor and the mean velocity profile, a very high agreement was successfully obtained for both. The universal value of the pipe friction factor and the universal profile of the mean velocity in a pipe flow were clarified. The physical reason for the Superpipe's value in the previous study was found to be the velocity profile in the wake.

研究分野：流体力学

キーワード：高レイノルズ数 円管流れ LDV 乱流

### 1. 研究開始当初の背景

壁乱流における平均速度分布や乱流強度分布は古典的な理論的な研究においては普遍性を有するとされてきていた。低レイノルズ数においては粘性の影響が強くレイノルズ数依存性が観測されるが、高レイノルズ数において慣性力が支配的になることにより、壁乱流における各種の統計量においては普遍的な分布となることが期待される。そのような背景から、理論的な裏付けのために、2000年あたりから高レイノルズ数における壁乱流の実験的研究が進み、特に円管流れおよび平板境界層に関するいくつかのデータが出始めた。ところが、これらの実験データは、古典的な理論を裏付けるには実験間の偏差も大きく、精度的には不十分であった。特に、壁乱流のうち円管流れのパイオニアである Superpipe (Princeton 大学、Zagallora and Simits, 1998) における平均速度分布の結果が、特に他の壁乱流(チャネル、平板境界層)と大きく異なることが疑問視されたのである。また、Superpipe における管摩擦係数においては Prandtl の式より大きくなる結果が示されており、同様に計測精度も含めた議論がなされてきている。平均流速分布の計測に関しては流速計測に関する機器の空間分解能、また管摩擦係数からは、壁面の粗さの影響などである。そのような背景の中、本研究代表者らは、Hi-Reff と呼ぶ高レイノルズ数の実験設備を新たに構築し (Furuichi et al., 2009)、この設備を用いて管摩擦係数および平均速度分布計測を行ってきた。その結果として、管摩擦係数においては、高レイノルズ数において Prandtl の式よりも数%値が小さく、また Superpipe の結果に比して 5~6%も値が小さいことを示した (Furuichi et al., 2015)。また、平均流速分布においてその分布の型を示す代表的な値であるカルマン定数も、Superpipe が 0.41~0.42 を示すところ、0.38~0.385 と小さく得られた。この値は、他の壁乱流の値に近く、その妥当性は高いものと考えられる。ところが、その後においては新たな実験データが示されることはなく、もうひとつの高レイノルズ数設備である CICLoPE においては、カルマン定数こそ比較的 Hi-Reff の結果に近い値を示してきているものの、管摩擦係数は断面平均速度の決定方法によってどちらの値ともなりうるという、非常に曖昧な表現しかなされていない。そのため、どちらの値がより真値に近いのかという問いは、研究開始当初時期においてはまったく不明であった。Hi-Reff においても、速度分布と管摩擦係数の関係性を明確にしており (Furuichi et al., 2018) その計測精度においては十分な妥当性を有するものと考えているが、上記の異なりにおいては何が物理的な理由になっているかを明確にできなければ、どちらの値を真値に近いと考えるかを示すことはできない。

### 2. 研究の目的

本研究における目的は、Superpipe と Hi-Reff における管摩擦係数と平均速度分布の差異に関連して、どちらが真値に近いと考えるか、また、それらの差異に関する物理的理由は何か、ということを確認することを目的とした。このような差異を明らかにする研究から、高レイノルズ数円管流れにおける普遍性について明らかにすることを、本研究の目的とした。

### 3. 研究の方法

(1) 管摩擦係数と平均速度分布において、Superpipe と Hi-Reff の異なりを検証するためには、第三者としての研究設備の実験結果を基に行うことが最も望ましいものと考えられる。そこで、本研究において最も核心となる研究として、ドイツ PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) における高温流設備(GraTEST)により、高レイノルズ数実験を行い、まず、Hi-Reff の結果の妥当性を確認する。管摩擦係数においては、Hi-Reff 同様の試験を行うが、速度分布計測においては、PTB が開発した計測法である高空間分解能 LDV を用いて計測する。

(2) 上記の比較実験の成果と、Hi-Reff における研究成果を元に、Superpipe のデータとの詳細な比較を行い、その物理的理由を明らかにする。

### 4. 研究成果

(1) 管摩擦係数において、Hi-Reff と PTB における GraTEST との比較を実施した結果、非常に良く一致するという成果が得られた。図 1 にその比較結果を示す。この図は管摩擦係数を Prandtl 式による値に対して相対値として求めた結果である。この図から分かるように、Hi-Reff と GraTEST は非常に高い一貫性が見られるが、一方、Superpipe

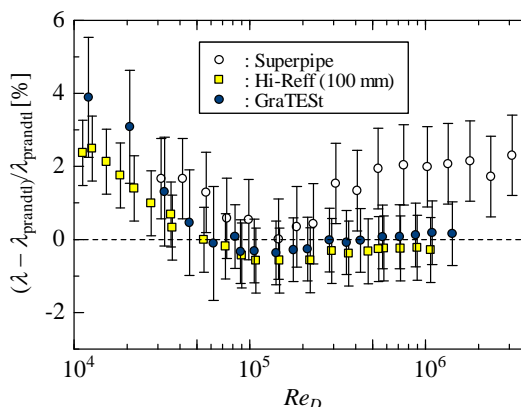


図 1. GraTEST, Hi-Reff および Superpipe における管摩擦係数の比較結果 (管摩擦係数  $\lambda$ 、 $\lambda_{Prandtl}$  は Prandtl 式から得られる値)

の結果においては、 $Re_D > 3 \times 10^5$  において偏差が観測される。この偏差を計測における不確かさを考慮して比較したものが図2である。En 値とは、これが1以下であれば、不確かさの範疇において両者のデータが一致するとされる指標である。Hi-Reff と GraTESt の比較においては全てのレイノルズ数のデータにおいて1以下であるが、Superpipe との比較では、高レイノルズ数において一致していないことになる。以上の結果から、Hi-Reff における管摩擦係数の結果の妥当性が示されることになった。

(2) 平均速度分布の比較において、Hi-Reff と GraTESt が良好に一致するという成果を得た。図3に平均速度分布の比較結果を示す。GraTESt における計測においては、壁面近傍の計測において改善の必要があるものの、対数領域後半から外層にかけては十分に計測することができた。その結果として、カルマン定数においては、概ね Hi-Reff と同一の結果となり、また Wake 領域においても中心にかけて非常に良く一致する結果が得られた。管摩擦係数の結果と合わせて、Hi-Reff における平均速度分布の計測結果が妥当であることが示された。

(3) Hi-Reff と Superpipe の管摩擦係数の異なりについて、Wake 領域における速度分布の異なりであることを明らかにした。Superpipe においては、径の異なるピトー管および細線長さの異なる熱線による計測を行っており、その計測方法ごとに結果が異なる。したがって、何を基準にすればよいかは明らかではないが、最も信頼性が高いと考えられる、NSTAP と呼ばれるナノスケールオーダーの細線長さの熱線による結果 (Hultramak et al., 2012) を比較した。図4にその比較結果を示しているが、対数領域においては、カルマン定数は Hi-Reff による結果と一致する。異なりは壁面近傍と、Wake 領域における分布である。壁面近傍については、おそらく計測方法に依存したものであると考えられるが、その影響が小さいと考えられる Wake 領域の結果は、流動場そのものの違いである。同じレイノルズ数において対数領域が一致するということは、壁面せん断応力の推定については両者において問題はないと考えられる。これは差圧計測に問題がないことを示す。一方、Wake において Superpipe の流速が Hi-Reff に比して小さいということは、同じレイノルズ数においてバルク速度が小さいことを意味する。管摩擦係数は、差圧計測に比例、バルク速度に反比例する。Superpipe においては、バルク速度が小さいことにより管摩擦係数が増大していると考えられる。これは、GraTESt との比較において、Wake 領域の速度分布が一致していることもこの考え方を支持する。Superpipe は速度分布からバルク速度を推定しているが、Hi-Reff と GraTESt においては、高精度流量計測からバルク速度を算出している。この精度の差は非常に大きく、Hi-Reff と GraTESt の結果の妥当性を支持するものである。

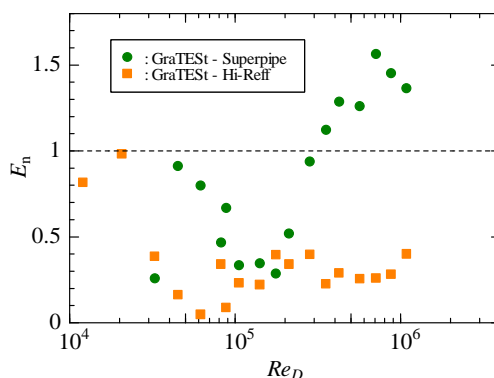


図2. GraTESt, Hi-Reff および Superpipe における管摩擦係数に対する  $En$  値

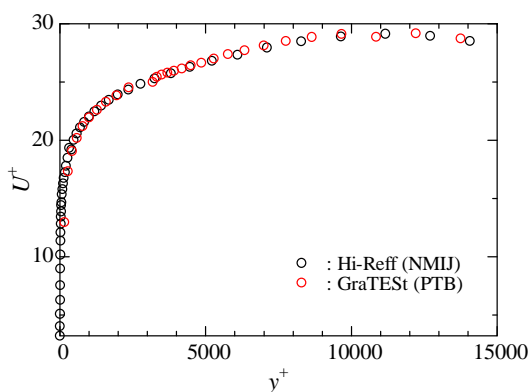


図3.  $Re_\tau=11200$  における平均速度分布の結果

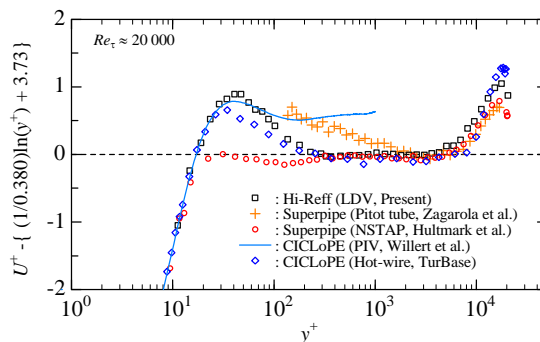


図4.  $Re_\tau \approx 20000$  における Hi-Reff と Superpipe の平均速度分布の比較

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Furuichi Noriyuki, Ono Marie	4. 巻 79
2. 論文標題 Static pressure measurement error for wall taps with high Reynolds number turbulent pipe flow	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Flow Measurement and Instrumentation	6. 最初と最後の頁 101962 ~ 101962
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.flowmeasinst.2021.101962	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Wada Yuki, Furuichi Noriyuki, Tsuji Yoshiyuki	4. 巻 91
2. 論文標題 Correction method of measurement volume effects on time-averaged statistics for laser Doppler velocimetry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 European Journal of Mechanics - B/Fluids	6. 最初と最後の頁 233 ~ 243
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.euromechflu.2021.10.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ono Marie, Furuichi Noriyuki, Wada Yuki, Kurihara Noboru, Tsuji Yoshiyuki	4. 巻 34
2. 論文標題 Reynolds number dependence of inner peak turbulence intensity in pipe flow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 045103 ~ 045103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0084863	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ono Marie, Furuichi Noriyuki, Tsuji Yoshiyuki	4. 巻 975
2. 論文標題 Reynolds number dependence of turbulent kinetic energy and energy balance of the 3-component turbulence intensity in a pipe flow	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A9-1 - A9-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2023.842	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 小野満里絵
2. 発表標題 STATISTICAL CHARACTERISTICS OF THREE-COMPONENT TURBULENCE INTENSITIES FOR HIGH REYNOLDS NUMBER PIPE FLOW USING LDV
3. 学会等名 Turbulence shear flow phenomena (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古市紀之
2. 発表標題 高レイノルズ数円管流の対数領域における自己相似性に関する研究
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古市紀之
2. 発表標題 Turbulence statistics of logarithmic region in pipe flow at high Reynolds number
3. 学会等名 International conference on fluid dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野満里絵
2. 発表標題 高レイノルズ数円管流れにおける乱流構造—LDVによる壁面近傍乱流統計量—
3. 学会等名 流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古市紀之
2. 発表標題 高レイノルズ数円管流れにおける乱流構造 - 3方向成分の計測とスケージング -
3. 学会等名 流体力学学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小野満里恵
2. 発表標題 LDV Measurement Issues for High Reynolds Number Turbulent Pipe Flow
3. 学会等名 ICFD2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小野満里恵
2. 発表標題 高レイノルズ数円管流れにおけるレイノルズ応力のLDV計測
3. 学会等名 第99回流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古市紀之
2. 発表標題 On the mean velocity and turbulence intensity profiles in pipe flows at high Reynolds number
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 古市紀之
2. 発表標題 Higher-order moments of three velocity components in pipe flow at high Reynolds number
3. 学会等名 93rd Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小野満里恵
2. 発表標題 Scaling of turbulence statistics for three velocity components and turbulence kinetic energy in pipe flow
3. 学会等名 European Turbulence Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	辻 義之 (Tsuji Yoshiyuki)  (00252255)	名古屋大学・工学研究科・教授  (13901)	
研究分担者	経田 僚昭 (Kyoden Tomoaki)  (50579729)	富山高等専門学校・その他部局等・准教授  (53203)	
研究分担者	和田 裕貴 (Wada Yuki)  (80836718)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・安全研究・防災支援部門 安全研究センター・研究職  (82110)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小野 満里絵  (Ono Marie)  (80883090)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員    (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	PTB			