

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03923

研究課題名(和文)高レイノルズ数円管流れにおける摩擦損失係数の定式化と普遍速度分布に関する研究

研究課題名(英文) Study for universal function of friction coefficient and velocity profile in pipe flow at high Reynolds number

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) 12,900,000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と流速分布に対する普遍性に関する研究を行った。本研究は高レイノルズ数実流試験設備を用い、流量を高精度に計測することによる摩擦速度やレイノルズ数を高精度に求めることができる点が最大の特徴である。流速分布をLDVを用いて行い、その計測結果の妥当性の検証を詳細に行った。特に、流速分布から求められる管摩擦係数と圧力勾配から実測された値が非常に良い一致を示した。この結果を元に、流速分布を対数則により現した場合の傾き(カルマン定数)を精度良く算出し、その値は0.384であった。他の壁乱流における値と非常に良い一致を示しており、壁乱流における普遍性を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：An universal relation between the friction factor and velocity profile in a pipe flow at high Reynolds number was studied. The most important feature of this experiment is to obtain a flow rate with high accuracy using high Reynolds number actual flow facility. The high accurate flow rate measurement brings a high accurate friction velocity and Reynolds number. The velocity profile was measured using LDV and the measurement results was validated in detail. Especially, we indicated that the friction factor obtained by the direct integration of velocity profile and measurement friction factor by the pressure drop agrees very well. Based on this result, Karman constant which is the inclination in log-law velocity profile, is estimated to be 0.384. This value is nice agreement with the other canonical flows such as boundary layer and channel flow.

研究分野：流体工学

キーワード：流速分布 高レイノルズ数 円管流 カルマン定数 流量計測

1. 研究開始当初の背景

発達した管内流における流れ方向成分に対する平均流速分布は、壁変数で無次元化した場合、

$$u^+ = (1/\kappa) \ln y^+ + B \quad (1)$$

と対数則で示される。ここで κ はカルマン定数、 B は切片定数と呼ばれる。カルマン定数は対数法則が普遍的流速分布であれば一定値となるが、実際には $0.35 \sim 0.42$ と幅広い値が提案されており、 κ が普遍定数になるか研究開始当初時期においては明らかにされていなかった。このKarmanとPrandtlが対数則を半理論的に導いた背景に高レイノルズ数での成立を予測しているが、通常の室内実験では対数則の普遍性を検証することは非常に難しいことから、カルマン定数がばらつく要因もそこにあった。平均速度分布の普遍性に関する議論は、ここ20年間に膨大な研究が報告されてきた。しかし、特に円管流に限っては対数則かべき乗則の妥当性やカルマン定数の普遍性への回答を得るにはいたっていない。これは速度分布式から導くことができる管摩擦係数についても同様である。その主要因は低レイノルズ数領域における室内規模の試験だけでは、普遍的な解を得るにいたらなかったためである。実験や数値計算により研究が可能なバルクのレイノルズ数は、研究開始当初を含め現状ではせいぜい 10^5 オーダーであるが、一方で乱流構造の普遍性を議論するために必要なレイノルズ数は $10^6 \sim 10^7$ と乖離がある。 10^7 オーダーの高レイノルズ数円管乱流の実験として、Princeton大学におけるSuperpipeの実験が研究開始当初には実施されていたが、この結果に関しては数多くの研究者がその妥当性確認が行われた。特に、カルマン定数は、他の壁乱流における値と大きく異なる結果となっている点に注目された。しかしながら、他に高レイノルズ数の円管実験がないことから、十分な検証まで到達していなかった。この結果に触発され、新たな大規模実験設備CICLoPEが構築されつつあったが、研究開発当初においては、まだ十分な実験結果を得る状況にはなかった。

2. 研究の目的

報告者らは近年、図1に示す高レイノルズ数試験設備(Hi-Reff)を開発し、完全発達乱流における円管流れの基礎実験を可能とした。この設備を用いて、管摩擦係数 λ を広範囲のレイノルズ数($Re_D=10^4 \sim 10^7$)にて計測した結果を図2に示す。Exp.1は内径100mmの配管、Exp.2とExp.3は387mmの配管に対して、水温を 20°C 、 70°C にてそれぞれ実験を行った結果である。縦軸は計測値をPrandtlの経験式からの相対誤差として示している。Princeton大学の結果と比較すると、 $Re_D > 10^5$ において、報告者らの結果は全く逆の傾向を示している。 $Re_D \sim 10^7$ において、差異は約6%となり、実験的な誤差とは考えられない。本研究では、2つの大型実験施設で計測された損失係数が一致

しないこと、かつレイノルズ数に対する相反する傾向を示す、その物理的要因を明らかにすることを最終的な目標に設定し、まず平均流速分布を計測することから、摩擦損失係数の妥当性を裏付け、円管流れにおけるカルマン定数の普遍値を実験的に明らかにする。そのうえで、管摩擦係数に対する新たな式を提案する。

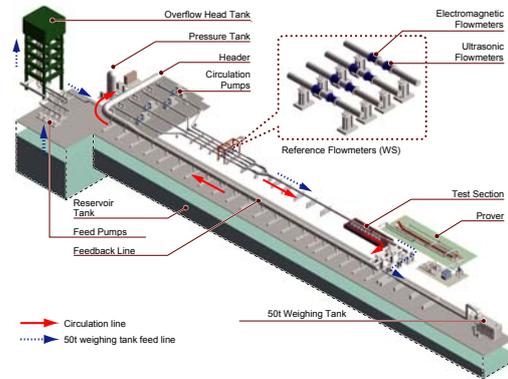


図1. 高レイノルズ数実流試験設備

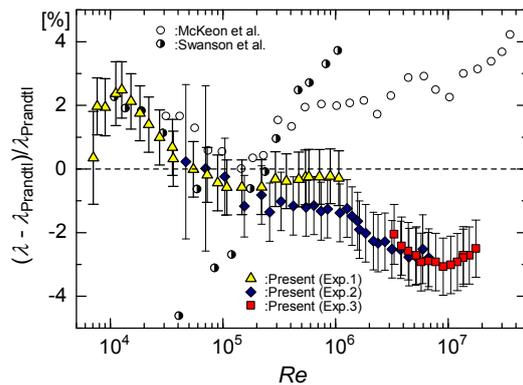


図2. 管摩擦係数

3. 研究の方法

管摩擦係数における実験結果を検証するために、流速分布計測を行う。流速分布計測はLDVを用いて行う。十分に研磨された滑管の下流側に、計測用ウィンドウを備えたチャンバーを設置する。LDVは三次元トラバースを用い移動し、屈折率を含めた計測座標に十分に注意を払った計測を行う。実験対象は、管摩擦係数を計測したものと同様に、100mmの配管と387mmの配管に対して行う。

検証方法は次となる。壁乱流におけるオーバーラップ領域に対する速度分布は(1)式のように表される。(1)式を積分することにより、管摩擦係数に関する次の式が導出される。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{1}{2\kappa\sqrt{2}} \ln(Re_D \sqrt{\lambda}) + \frac{B}{2\sqrt{2}} - \frac{1}{2\kappa\sqrt{2}} \left\{ \frac{3}{2} + \ln(4\sqrt{2}) \right\} \quad (2)$$

ここで、 λ は管摩擦係数、 Re_D はバルク速度(U_b)を代表速度、管径 D を代表長さとする管レイノルズ数である。よく知られるPrandtlの式は、Nikradseの管摩擦係数に関する実験結果を式(2)にフィッティングした結果として得られて

いるが、本質的には、式(1)と式(2)における κ 、 B には整合性が求められる。すなわち、速度分布の計測結果により求められた式(1)の各定数が、管摩擦係数の計測結果から求められた式(2)の各定数に一致するのであれば、これらの計測結果は相互に高い信頼性があると認められる。以上の方法に基づいた解析を行い、速度分布と管摩擦係数の関連性を明確にし、計測結果の妥当性を示す。そのうえで、円管におけるカルマン定数の傾向や、管摩擦係数の定式化を行うこととする。

4. 研究成果

代表的な平均流速分布の計測結果を図3に示す。図3は100mm配管における流速分布である。387mmの結果についてはここには示さないが、両者とも非常に良く一致している。これらの流速分布を断面にわたり積分することにより算出される流量値は、秤量タンク等により得られる参照流量と、不確かさの範囲内にて一致した。このことは、十分に発達した軸対称流れであることを示すとともに、計測された流速の絶対値の信頼性が非常に高いことを示す。また、本結果から明らかのようにSuperpipeによるデータ(McKeon et al.)とは異なる傾向結果が得られている。

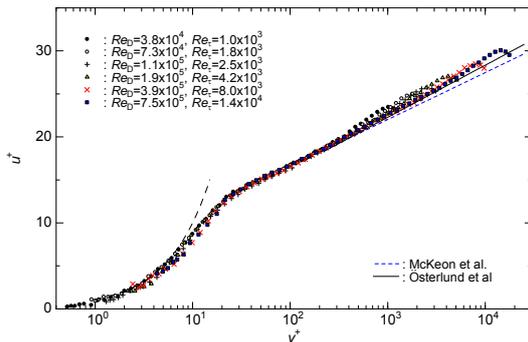


図3. 流速分布計測結果

まずオーバーラップ領域に対し、式(1)の対数則に基づき、 κ と B を求める。本実験においては、 $y^+ > 400$, $y/(D/2) < 0.2$ における一定勾配域に対して求めた。得られた κ のレイノルズ数特性を図4に示す。 κ は、 $Re_D < 3 \times 10^5$ においてレイノルズ数の増加とともに減少、 $3 \times 10^5 < Re_D < 5 \times 10^5$ においてわずかに値が大きくなり、 $Re_D > 5 \times 10^5$ においては概ね一定となる。また、この傾向は異なる配管径においても同一の結果として得られた。一定値はそれぞれ $\kappa = 0.384$ となる。この結果は、円管流れに対しては、Nagibらの整理におけるMontyの結果に近い。ただし、Montyの結果は低レイノルズ数における結果である。また、他の壁乱流における近年のカルマン定数の値とも非常によく一致しており(チャンネル流; 0.384~0.387, 平板境界層; 0.384), 壁乱流における流速分布に普遍的な解を与える意味で、物理的に非常に意義の高い結果であるといえる。

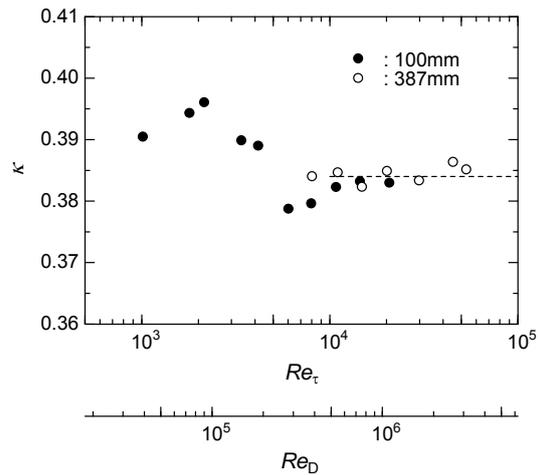


図4. カルマン定数

研究方法において述べた方法により、流速分布の計測結果と管摩擦係数の妥当性を検証する。しかしながら、式(1)はオーバーラップ領域に対する結果であり、粘性低層や後流の影響が式(2)に与える影響は無視できない。そこで本報告においては、内層にはMusker式にMonkewitzによる補正を加えた式を、外層にはColesによる後流関数を適用する。

$$U_i^+ = U_{iM}^+ + \frac{\exp[-\ln^2(y^+/d_1)]}{d_2} + \frac{2\pi}{\kappa} W(\eta) \quad (3)$$

ここで、 U_{iM} はMusker式による流速、 $W(\eta)$ は後流関数、 Π , d は定数である。

前述において得られたカルマン定数を元に、式(3)にフィッティングし、速度分布の関数形を得た。なお、後流関数には三次関数をあてた。代表的な速度分布のフィッティングの結果を図5に示す。実線が式(3)によるフィッティング、破線が式(1)による。また、レイノルズ数は下から $Re_\tau = 1.0 \times 10^3, 6.0 \times 10^3, 1.4 \times 10^4, 3.0 \times 10^4$ である。内層から外層にかけて、実験データが非常によく再現されていることが示されている。本結果において、式と実験データの差は、最大速度に対する相対値として0.7%以下であった。

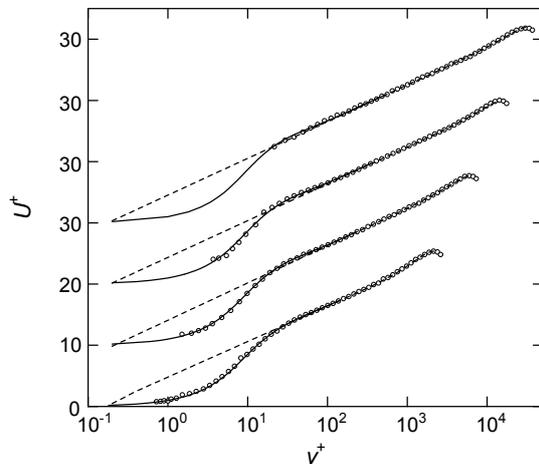


図5. フィッティングされた流速分布

ここで、式(3)を積分し、管摩擦係数を求めることが最も高い精度を有する方法であるが、Musker 式が煩雑であることおよび式(2)の形態から大きくかい離し、比較ができないことから、式(3)における内層部を単に式(1)に置き換える。

$$u^+ = (1/\kappa) \ln y^+ + B + (2\Pi/\kappa)W(\eta) \quad (4)$$

この式を積分し、内層部を考慮した補正項を組み込むと次の式が得られる。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{1}{2\kappa\sqrt{2}} \ln(Re_D\sqrt{\lambda}) + \frac{B}{2\sqrt{2}} - \frac{1}{2\kappa\sqrt{2}} \left\{ \frac{3}{2} + \ln(4\sqrt{2}) \right\} + \frac{\Pi}{\kappa\sqrt{2}} \left(\frac{b_1}{10} + \frac{b_2}{6} + \frac{b_3}{3} + b_4 \right) - C(Re_D) \quad (5)$$

b は三次関数の各係数を示す。ここで、内層に対する補正項 $C(Re_D)$ については、式(3)と式(4)の差を数値積分することにより算出される。先に得られた各定数を用いると、次の式が速度分布の計測結果から得られる管摩擦係数式となる。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.120 \log(Re_D\sqrt{\lambda}) - 1.284 - 3971 Re_D^{-1.115} \quad (6)$$

本式と管摩擦係数の計測結果を図 6 に示す。本結果において、 $3.8 \times 10^5 < Re_D < 3.1 \times 10^6$ ($1.0 \times 10^3 < Re_\tau < 5.3 \times 10^4$) のレイノルズ数の範囲においては、流速分布から求められた管摩擦係数と式(6)の偏差が 1.02%以内であった。特に、高レイノルズ数域において非常によく一致しており、流速分布の計測結果および管摩擦係数の実験結果の信頼性が非常に高いことが示された。

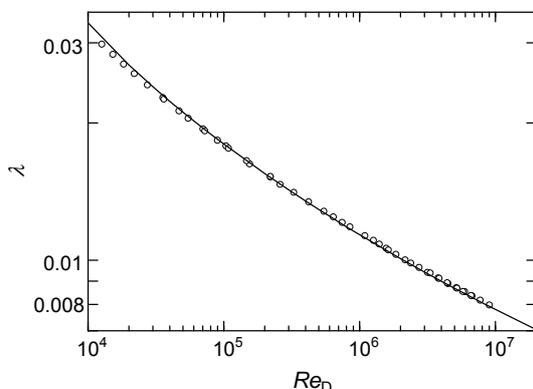


図 6. 実験データと式(6)の比較

最後に、図 2 に示される管摩擦係数の実験結果に対して式(2)をフィッティングした結果を下記に示す。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.092 \log(Re_D\sqrt{\lambda}) - 1.176 \quad (7)$$

本式は $1.2 \times 10^4 < Re_D < 1.8 \times 10^7$ のレイノルズ数の範囲において、0.77%以下の偏差にて実験結果を示す。ここで、式(7)はプランドルの式に対する新しい係数を与えており、工学的に重要な知見である。一方で、本式は κ がレイノルズ数に依存しないことを前提としている。しかしながら本実験における κ のレイノルズ数に対する特性からも、上記のレイノルズ数範

囲を全て網羅する形で式(7)を求めると、実際の κ とは異なる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① N. Furuichi, Y. Terao, Y. Wada, Y. Tsuji, Further experiments for mean velocity profile of pipe flow at high Reynolds number, Physics of Fluids, 査読有, 30, 055101 (2018); DOI: 10.1063/1.5017261
- ② N. Furuichi, Y. Terao, Y. Wada, Y. Tsuji, Friction factor and mean velocity profile for pipe flow at high Reynolds numbers, Physics of Fluids, 査読有, 27, 095108 (2015), doi: 10.1063/1.4930987
- ③ 古市紀之, 高レイノルズ数における流量計測, ながれ, 査読無, 36-5 (2017), pp. 315-320
- ④ 高レイノルズ数円管流れにおける平均速度プロファイルについて, 和田裕貴, 古市紀之, 寺尾吉哉, 辻義之, ながれ, 査読無, 34-6, (2015), pp.393-396
- ⑤ 高レイノルズ数円管流における外層領域乱流統計量に関する実験的考察, 和田裕貴, 古市紀之, 寺尾吉哉, 辻義之, 日本機械学会論文集, 査読有, 81-830 (2015), DOI: 10.1299/transjsme.15-00362
- ⑥ 高レイノルズ数円管流における平均速度分布型に関する実験的研究, 和田裕貴, 古市紀之, 寺尾吉哉, 辻義之, 日本機械学会論文集, 査読有, 81-826 (2015), DOI: 10.1299/transjsme.15-00091

[学会発表] (計 8 件)

- ① 草野 英祐, 古市紀之, 和田 裕貴, 嶋田 隆司, 辻義之, 高レイノルズ数円管流れに関する実験的研究—大口径配管における平均速度と乱流強度分布—, 日本流体力学会年会, 2017
- ② N. Furuichi, Y. Terao, Y. Wada, Y. Tsuji, Relation between Velocity Profile and Friction Factor at High Reynolds Number in Fully Developed Pipe Flow, 10th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP10), 査読有, Chicago, USA, July, 2017
- ③ 古市紀之, 和田裕貴, 寺尾吉哉, 辻義之, 円管乱流における管摩擦係数の信頼性—平均速度分布からの検証, 日本機械学会流体工学部門講演会 (2016.11.12-13, 宇部)
- ④ N. Furuichi, Y. Terao, Y. Wada, Y. Tsuji, High Reynolds number examination for fully developed pipe flow - Mean velocity profile and friction factor, APS meeting, 2017
- ⑤ 古市紀之, 和田裕貴, 寺尾吉哉, 辻義之, 高レイノルズ数円管流れにおける管摩擦係数と流速分布, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 先端技術フォーラム, 2016

⑥ N. Furuichi, Y. Terao, Y. Tsuji, High Reynolds number actual flow facility “Hi-Reff” and measurement uncertainties, Workshop on High Reynolds number turbulent flow – A large-scale infrastructure perspective, University Centre of Bertinoro, Bertinoro, Italy, 2016.9.5 - 9.6

⑦ 古市紀之, 和田裕貴, 寺尾吉哉, 辻義之, 高レイノルズ数円管乱流における管摩擦係数と流速分布, 日本機械学会流体工学部門講演会 (2015.11.7-8, 東京)

⑧ 和田裕貴, 古市紀之, 寺尾吉哉, 辻義之, 高レイノルズ数円管乱流における速度分布の普遍性, 日本機械学会流体工学部門講演会 (2015.11.7-8, 東京)

[図書] (計 1 件)

① N. Furuichi, Y. Terao, and Y. Tsuji, High Reynolds number experimental facilities for turbulent pipe flow at NMIJ, Progress in Turbulence VII, Springer, 89-94 (2017).

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

辻 義之 (TSUJI, Yoshiyuki)
名古屋大学・工学研究科・教授
研究者番号：00252255

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()