

超音波流量計の高精度化に向けた 高レイノルズ数管内流に関する調査研究

小野満里絵*

(2021年1月29日受理)

A survey on high Reynolds number pipe flow for high accurate flowrate measurement using ultrasonic flowmeter

ONO Marie

Abstract

High Reynolds number pipe flow can be seen in many plants such as chemical, food and power plants, since not only the pipe diameter but also flowrate is generally large. High accurate flowrate measurements in such flow fields contribute for energy saving, low environmental load and safety issues in plants. An ultrasonic flowmeter is expected to achieve high accurate flowrate measurement at high Reynolds number. In this report, uncertainty factors for ultrasonic flowmeter are surveyed in terms of the difference of the velocity profile in the pipe between an ideal condition and actual field. Especially, the influence of a conversion factor of velocity profile, roughness of the pipe and distorted flow are reported. This report reviews these uncertainty factors in detail and discusses the future prospects about high accurate flowrate measurement using the ultrasonic flowmeter.

1. はじめに

流量計は上下水道や発電プラント、食品や化学等の生産プラント、医療分野などその利用は日常から工業まで多岐にわたる。近年のエネルギー高効率化や環境負荷低減、安全性向上への要求に対して、流量計測の高精度化が果たす役割は大きい。流量計の種別は流体の種類や流量範囲、目的とする計測精度、コスト、配管の口径などに合わせて最適なものが選択される必要がある。しかしながら、大口径・大流量における流量計測はそのスケールの大きさから適応可能な流量計が非常に限られている。表1に工業界で汎用的に用いられている各種流量計の適応可能な口径を示す¹⁾。超音波流量計以外の流量計は基本的には配管と一体の構造であり、流量計そのもの

を口径に合わせたスケールで製作する必要があることから大口径への適応は容易ではない。一方、超音波流量計のうちクランプオン式と呼ばれるタイプは、配管に直接設置することが可能であることから、流量計本体そのもののスケールアップは要求されない。そのため、大口径

表1 各種流量計の適応可能な最大口径 [mm]¹⁾

超音波流量計	7000
渦流量計	4000
電磁流量計	3000
差圧流量計	3000
タービン流量計	600
容積流量計	500
面積流量計	400
質量流量計	150

* 工学計測標準研究部門液体流量標準研究グループ

配管において用いることが可能である。発電プラントやその他の化学・食品などの大型プラントには大流量および大口径の条件が多く見られる。例えば、水車を用いた水力発電では、1500 mm から 5500 mm の非常に大きな口径の配管が設置されている²⁾。このような大口径・大流量といった、いわゆる高レイノルズ数条件下における流量計測技術の高精度化は、前述のエネルギー効率や環境負荷低減には重要である。このレイノルズ数とは流動状態を示す重要な無次元数であり、慣性力と粘性力との比として以下の式により定義される。

$$Re = \frac{DV_b}{\nu} \quad (1)$$

ここで、 Re はレイノルズ数 (SI の記法に厳密に従うと、レイノルズ数は N_{Re} や R などと記載されるべきであるが、本書では「 Re 」と表記し、以降使用することとする)、 D は配管径、 V_b は管断面平均流速、 ν は動粘性係数である。式 (1) からわかるように、口径および流速 (流量) が大きくなるほどレイノルズ数は高くなる。表 1 に示す通り、発電プラントにおいて見られるような大口径、つまり高レイノルズ数条件では多くの流量計が適応外となり、主に超音波流量計、特にクランプオン式³⁾が有用であると言える。

クランプオン式超音波流量計は大口径配管に適応可能という特徴の他、もうひとつの大きな可能性を有している。それは持ち運びが容易で一般的な配管の外側に設置が可能であることから、実プラント等の現場において参照流量計として用いることができ、既設流量計のオンサイトキャリブレーション (現地校正) を可能とする点である。

流量計はその多くが流動条件に強く影響を受けることから、校正された流量計を用いても設置現場において目的の精度が得られない場合がある⁴⁾。そのため、実流動場で参照流量計によって校正するオンサイトキャリブレーションは、流量計測において非常に強い要望のひとつとなっている。しかしながら、実プラント中の配管において、配管の間に新たに参照流量計を設置することは困難であることが多く、また、その流量の大きさからオンサイトキャリブレーションは現実的に難しい。例えば、鳥津システムソリューションズが行っているオンサイトキャリブレーションのサービスは最大流量 48 m³/h としており、高レイノルズ数域には対応していない⁵⁾。高レイノルズ数条件下における計測誤差は、大きなエネルギー損失や環境負荷の増大に繋がるケースが多くあることから、高精度計測、そしてそれを達成するためのオンサイトキャリブレーション技術は重要であると考え

られる。クランプオン式超音波流量計は他の流量計と異なり、設置面で優れた特性を有するためこれをオンサイトキャリブレーションにおける参照流量計として用いることが最も可能性があると考えられる。

本報告においては、高レイノルズ数における高精度流量計測およびオンサイトキャリブレーションの実現に向けて、超音波流量計の高精度化への展望について調査を行った。超音波流量計の精度には理想状態の流速分布や配管の表面粗さ、上流条件といった管内流に関する不確かさが大きく関わっている。本報告では、超音波流量計の高精度化にむけて管内流動状態が超音波流量計測に与える影響について調査した結果を報告する。

2. 超音波流量計計測に影響を及ぼす管内流について

2.1 超音波流量計の原理と特徴

本節においてまず、超音波流量計の原理について説明する。超音波流量計における原理は主に 2 種類ある。1 つ目は流体中の気泡や粒子などにより超音波が反射し、ドップラー効果によりシフトした周波数を計測することで流速および流量を求めるドップラー式超音波流量計である⁶⁾。2 つ目は 2 つのトランスデューサー間において送受信される超音波の伝搬時間差より流速および流量を求める伝搬時間差式超音波流量計である¹⁾。ドップラー式は原理的に気泡や粒子が必要となるため、流体が清浄な水の場合は計測できず、主に下水などの計測に限られている⁷⁾。不純物が少ない水などの流体に適応可能な方式は伝搬時間差式で、実際に産業界で汎用的に用いられている⁸⁾。

本報告ではより多くの実流動場で用いられていることから伝搬時間差式超音波流量計を対象とした調査報告を行う。また、高レイノルズ数条件下における高精度流量計測とオンサイトキャリブレーションの実現という観点からクランプオン式に特に着目した。以下、本報告における超音波流量計は、クランプオン式による伝搬時間差式を指す。

伝搬時間差式超音波流量計の原理は前述したように、超音波を流体の流れに沿う順方向と逆方向にそれぞれ伝搬させた時に、流速に応じて伝搬速度が加減されてそれぞれの伝搬時間に差が生じることを利用して流速を求める計測法である。超音波流量計の模式図を図 1 に示す。超音波伝搬経路と流れの方向とがなす角度を θ 、トランスデューサー間の距離を L 、上流側トランスデューサー A から下流側トランスデューサー B へ超音波が伝搬する時間を $t_{A \rightarrow B}$ 、B から A へ超音波が伝搬する時間を

$t_{B \rightarrow A}$ とすると、トランスデューサー間の線平均流速 V_L は次式で表される。

$$V_L = \frac{L}{2 \cos \theta} \left(\frac{1}{t_{A \rightarrow B}} - \frac{1}{t_{B \rightarrow A}} \right) \quad (2)$$

目的とする流量を算出するには、実際には線平均流速 V_L ではなく、管断面平均流速 V_b が必要である。そこで超音波流量計では式 (3) で示すように、流速変換係数 k_{uf} を用いて線平均流速を管断面平均流速に変換し、流量 Q を算出している⁹⁾。

$$Q = V_b A = \frac{1}{k_{uf}} V_L A \quad (3)$$

ここで、 A は管断面積を示す。

次に、クランプオン式の伝搬時間差式超音波流量計の特徴を以下に挙げておく¹⁰⁾。

- 大口径、大流量に有効
- 配管の外側から設置可能（オンサイトキャリブレーションの可能性）
- 流体の電気伝導性、非伝導性に制限を受けない
- 流体に触れないため、腐食の心配がある流体にも使用可能
- 気泡や粒子が少ない流体に適応
- 流れを妨げず、圧力損失がない

これらの特徴から、発電プラント以外にも、水道用や非伝導体を扱う石油工業、腐食の激しい化学工業、純水を取り扱う半導体分野などに用いることが可能である。

2.2 超音波流量計の不確かさ要因

多くの利点を有する超音波流量計だが、オンサイトキャリブレーションを行う際に参照流量計として用いるためには精度の向上が課題であると考えられる。表2に他の流量計とともに超音波流量計の一般的な計測精度を示す¹⁾。他の流量計と比較して、超音波流量計において

期待される精度は低いもの、参照流量計に用いるためにはより高い精度が必要である。

超音波流量計メーカーによる調査報告では超音波流量計の不確かさ要因は、表3に示すように4つに大別されている¹¹⁾。これらの合成拡張不確かさは0.94% ($k=2$ 相当)となる。各々の不確かさ要因について解説する。“Acoustics”は周波数や設置角度、ウェッジの素材などといったトランスデューサーに関する不確かさ要因が主である。“Geometry”は配管の径および材質、厚さなど配管幾何形状に関する要因であり、“Time Measurements”はノイズや伝搬時間差の計測などの電気的信号処理に関わる要因である。最も大きい不確かさ要因は“Hydraulics”と記述されている項目である。これは、「管内流（流速分布）に関する不確かさ」と言い換えることができる。この管内流の不確かさ要因は主に、

- 流速変換係数 k_{uf} （理想状態における流速分布）
- 内面粗さの影響
- 流速分布の不均一性

に分けることができる。理想状態（流体力学的に言えば、滑面上において完全発達した流れの状態）において管内流は図2(a)に示すような分布となる。この理想状態では、管内の流れは配管表面の粗さや上流の影響を受けていない。一方、配管が一定以上の粗さを有する場合、管内の流れは粗さの影響を受け、図2(b)に示すように流速分布が理想状態から変化する。また、計測位

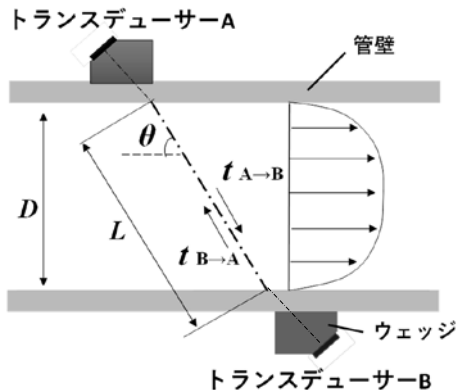


図1 クランプオン式超音波流量計の模式図

表2 各流量計の計測精度¹⁾

計測精度	
電磁流量計	0.5% から 1.0% (RD)
超音波流量計	1.0% から 1.5% (FS)
渦流量計	1.0% から 3.0% (RD)
差圧流量計	2.0% (FS)

※ FS: フルスケール精度
※ RD: リードスケール精度

表3 伝搬時間差式クランプオン型超音波流量計の不確かさ要因¹¹⁾

Hydraulics	0.70%
Acoustics	0.42%
Geometry	0.25%
Time Measurements	0.40%
Expanded uncertainty ($k=2$)	0.94%

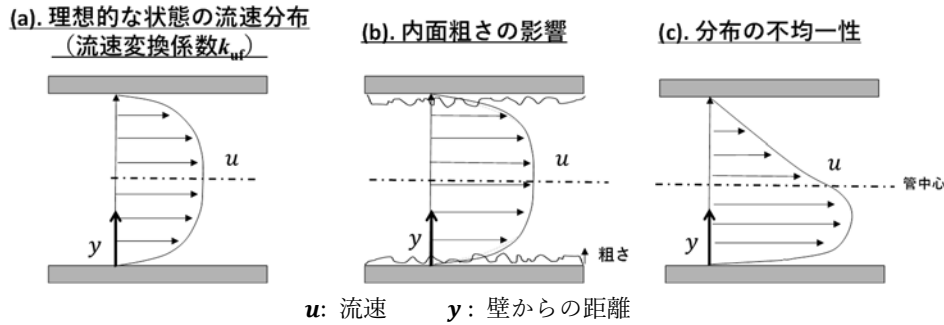


図2 管内の流速分布

置から近い上流に曲がり管などが存在すると、流速分布が図2(c)に示すように軸に対して不均一になる。このような流速分布の状態が流量計測に対する不確かさ要因となる。ここで、流速変換係数 k_{uf} は理想状態を仮定して流量計にあらかじめ組み込まれるものであり、また内面粗さと分布の不均一性は計測場ごとに異なるものであることを改めて注記する。次章以降において、それぞれの不確かさ要因に関して詳説する。

3. 流速変換係数 k_{uf} ・理想状態の流速分布に関する不確かさについて

3.1 流速変換係数 k_{uf} の算出式

超音波流量計における流速変換係数の不確かさについて説明するために、この係数がどのように求められているかを解説する。流速変換係数の算出には、以下に示すビルゲルの式(4)やブラジウスの式(5)がよく用いられる^{1),12)}。

$$k_{uf} = 1 + 0.001\sqrt{6.25 + 431Re^{-0.237}} \quad (4)$$

$$k_{uf} = 1 + 0.2488Re^{-\frac{1}{8}} \quad (5)$$

これらの式は前述のように理想的な状態における流速分布を仮定して求められている。層流域 ($Re < 2300$) における流速分布は理論的に決定できるが、乱流域 ($Re > 4000$) においては乱流構造をモデル化した形で流速分布型が示される。日常でも工業的にも身の回りのほとんどの流れはこの乱流と呼ばれる状態にあることから、乱流における流速分布型が重要になってくる。乱流における流速分布型としては、次の対数則(6)が最も一般的であるとされる¹³⁾。

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \quad (6)$$

ここで、 $u^+ = u/u_\tau$ 、 $y^+ = yu_\tau/\nu$ である。 u_τ は摩擦速度と呼

ばれ、流れが受ける摩擦の大きさを速度の次元で表したものである。異なるレイノルズ数における管内の速度分布を比較するために流体力学分野ではしばしばこのように摩擦速度や動粘性係数で無次元化した管内速度 u^+ や壁からの距離 y^+ が用いられる。また、実験的に κ および B の値はそれぞれ 0.4 および 5.5 と求められ、一般的に用いられる対数則は以下の式で表される。

$$u^+ = \frac{1}{0.4} \ln y^+ + 5.5 \quad (7)$$

この式を用いてビルゲルの式(4)およびブラジウスの式(5)が導出される(次節に詳説)。

乱流における流速分布型を記述する式として、次のべき乗則(8)も良く知られている。

$$u^+ = A(y^+)^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

ここで、 A は実験等により求められる定数、 n はレイノルズ数の関数である。一般的に用いられる定数を含めたべき乗則を式(9)に示す¹³⁾。

$$u^+ = 8.74(y^+)^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

このように、対数則やべき乗則がこれまで報告されているが、どちらがより正確に乱流の理想状態の流速分布を示しているのか、あるいはレイノルズ数や管内の領域によって両方成立するものなのかなどについては、長年議論の対象となっている¹⁴⁾。次節では対数則が成立する仮定のもと、対数則の流速分布式から流速変換係数算出式であるビルゲルの式(4)の導出について解説する。

3.2 流速変換係数 k_{uf} の導出

流速変換係数算出式として最も汎用的に用いられているビルゲルの式(4)の詳しい導出手順を示す¹⁵⁾。壁面からの距離に対して対数則を示した式(7)を管中心流速を用いて整理すると、式(10)が得られる。

$$u = u_{\max} + 2.5u_{\tau} \ln \frac{D/2-r}{D/2} \quad (10)$$

ここで、 u_{\max} は管中心流速、 r は管中心からの距離である。これを管断面で積分すると管断面平均流速 V_b が得られる。

$$\begin{aligned} V_b &= \frac{1}{\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2} \int_0^{\frac{D}{2}} u 2\pi r \, dr \\ &= \frac{8}{D^2} \int_0^{D/2} \left(u_{\max} + 2.5u_{\tau} \ln \frac{D/2-r}{D/2} \right) r \, dr \end{aligned} \quad (11)$$

これを整理すると、

$$V_b = u_{\max} - 3.75u_{\tau} \quad (12)$$

となり、また、式 (10) を管径で積分すると

$$\begin{aligned} V_L &= \frac{1}{D/2} \int_0^{D/2} u \, dr \\ &= \frac{2}{D} \int_0^{D/2} \left(u_{\max} + 2.5u_{\tau} \ln \frac{D/2-r}{D/2} \right) dr \end{aligned} \quad (13)$$

が得られる。これを整理して以下の式を得る。

$$V_L = u_{\max} - 2.5u_{\tau} \quad (14)$$

最終的に、式 (12) と式 (14) の差から以下の関係式が得られる。

$$V_L = V_b + 1.25u_{\tau} \quad (15)$$

ここでダルシーワイスバッハの式 (16) および Nikuradse の管摩擦係数の式 (17) を導入することでビルゲルの式 (4) が得られる¹⁶⁾。

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{\lambda}{8}} V_b \quad (16)$$

$$\lambda = 0.0032 + 0.221 Re^{-0.237} \quad (17)$$

ここで λ は管摩擦係数である。

以上の導出において重要な点は、流速変換係数算出式は乱流における理想状態の流速分布式および管摩擦係数の式より導出されているということである。どの流速分布式や管摩擦係数式が成立すると仮定するかによって求められる流速変換係数および流量値も異なる点に注意しなくてはならない。

流速分布式は同じ式 (10) を用い、管摩擦係数の式として式 (18) を採用した際に導出された式がブラジウスの式 (5) である¹⁷⁾。

$$\lambda = 0.3164 Re^{-\frac{1}{4}} \quad (18)$$

また、式 (9) のべき乗則から流速変換係数算出式を導出すると、式 (19) が得られる¹⁸⁾。

$$k_{uf} = \frac{2n+1}{2n} \quad n = 2 \log_{10} \frac{Re}{10} \quad (19)$$

このように用いる流速分布および管摩擦係数の式が異なると、これより導出される流速変換係数も異なってくる。

3.3 理想状態の流速分布式

高精度に流速変換係数を求めるためには、乱流における流速分布式が普遍的に適用できることが理想である。しかしながら、流速分布式については長年議論がなされているものの、そもそも対数則かべき乗則か、また、各々の法則が成り立つ場合、その定数はいかなる値になるかなど、今なお混沌としている状態にある¹⁴⁾。特に高レイノルズ数において、この傾向は顕著である。流速分布式としては1950年代から多くの報告がなされているものの、実用的なレイノルズ数まで実験を行った例はなかった。しかしながら、近年、アメリカ Princeton 大学の Superpipe と呼ばれる高レイノルズ数実験設備から新たに流速分布式が報告された¹⁹⁾。この実験の注目すべき点は発電プラントレベルのレイノルズ数 10^7 オーダーでの実験を行っていることである。この Superpipe における結果を含め、これまで報告された流速分布式および管摩擦係数の式を表4に示す^{16), 17), 19)-21)}。この表より、各研究グループにより様々な流速分布および管摩擦係数式が提案され、各係数が異なっていることが分かる。流速分布が定まっていない理由として、流速分布がそもそもレイノルズ数によって変化し、普遍的ではない可能性も示唆されている。流速分布を決定付けるためにも、普遍性について議論が可能となる高レイノルズ数における実験的研究は非常に重要であると考えられる。高レイノルズ数および高精度計測という観点から、産業技術総合研究所においても、水流量に関する国家標準設備 (High Reynolds Number Actual Flow Facility : Hi-Reff)²²⁾ を用い流速分布および管摩擦係数に関する実験がこれまで行われてきている^{20), 23)}。また、Superpipe や Hi-Reff 以外にも高レイノルズ数における実験結果が報告されており、その比較検討がされはじめて²⁴⁾⁻²⁶⁾。実現場レベルの高レイノルズ数条件における実験的研究は、流体力学および流量計測分野においても非常に注目を集めている。

3.4 各流速分布式から求めた流速変換係数 k_{uf}

前節までで、流速変換係数が理想状態の流速分布式および管摩擦係数の式より導出されているが、それらの式自体が一つに定まっていないという問題点を述べた。本節では、この流体力学の長年の未解決問題が実際の超音波流量計においてどのように影響するのかという点について具体的に説明する。表4に示した式のうち、各流速分布式および管摩擦係数の式が成立すると仮定して流速変換係数を求めた結果を図3に示す。表4の各式のうち、実験により流速分布式を求めたレイノルズ数の範囲を実線で、それ以降のレイノルズ数を点線で示した。Superpipe および Hi-Reff の式は 10^7 まで実測により式を得ているため、その範囲まで実線で表した。この図から、低レイノルズ数では各式による流速変換係数の偏差は最大1.41%、高レイノルズ数では最大0.82%となることが分かる。更に、高レイノルズ数条件下で求められた Superpipe と Hi-Reff のみで比較しても、 10^7 において偏差は0.32%と無視できない結果が得られた点も重要である。この流速変換係数は直接流量値に影響を与える。これは、超音波流量計で実測から得られる同じ線平均流速を用いて流量を計算しても、流速分布式の仮定における違いのみで指示される流量値に差が生じてしまう可能性があることを示している。

以上のように、理想状態における乱流の流速分布が定まっていないことが超音波流量計における流量計測の大きな不確かさ要因になると考えられるが、逆に、この流速分布式の高精度化が超音波流量計の高精度化に繋がるとも言える。世界的にみても、高レイノルズ数および高精度という点で流速分布や管摩擦係数式を求められる設備は非常に少ない^{14), 25)}。更に、高精度流量計測と高精度流速分布計測を同時に行える設備は産業技術総合研究所における Hi-Reff が唯一である²²⁾。その特性を活かし、今後はこれまで我々の研究グループが報告した流速分布

および管摩擦係数式の妥当性の評価やより高精度な式の提案を行っていく必要がある。

4. 内面粗さに関する不確かさ要因について

4.1 内面粗さが流量計測に及ぼす影響

プラントの経年劣化などにより超音波流量計の計測誤差が増大することが知られている。これは経年劣化により配管の内面粗さが増大し、その粗さの影響によって流速分布が変化した結果、流量値が過大に見積もられてしまうためであると考えられている^{27), 28)}。

粗さの異なる配管において超音波流量計による流量計測を行った実験例を図4に示した²⁹⁾。この実験では、一般スチール配管 ($R_q=0.003$ mm) と、より内面が粗い炭素鋼鍍管 ($R_q=0.019$ mm) において超音波流量計により

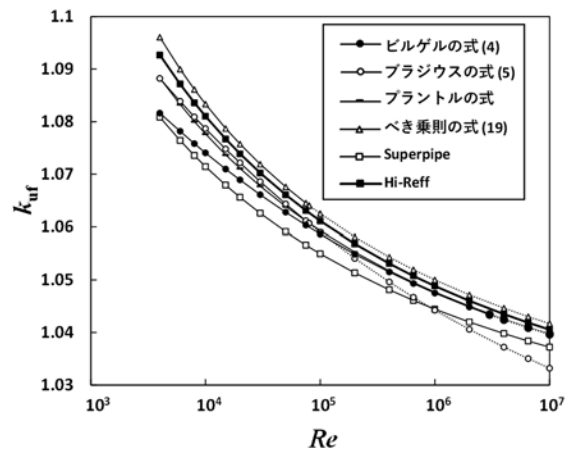


図3 各流速分布式より求めた流速変換係数のレイノルズ数特性

プラントルの式：式 (7) および表4中の式 (A) より導出
 Hi-Reff：表4中の式 (B) および式 (C) より導出
 Superpipe：表4中の式 (D) および式 (E) より導出

表4 各研究グループが報告した流速分布・管摩擦係数式^{16), 17), 19)-21)}

	速度分布式	管摩擦係数 λ の式
べき乗則	$u^+ = 8.74(y^+)^{\frac{1}{n}}$	$\lambda = 0.3164 Re^{-\frac{1}{4}}$ (Blasius, 1913)
	$u^+ = \frac{1}{0.4} \ln y^+ + 5.5$	$\lambda = 0.0032 + 0.221 Re^{-0.237}$ (Nikuradse, 1932)
対数則	$u^+ = \frac{1}{0.436} \ln y^+ + 6.15 \dots (B)$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log(Re\sqrt{\lambda}) - 0.8$ (Prandtl, 1933) $\dots (A)$
	$u^+ = \frac{1}{0.384} \ln y^+ + 4.53 \dots (D)$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.903 \log(Re\sqrt{\lambda}) - 0.537$ Superpipe (Zagarolla, 1998) $\dots (C)$
		$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.092 \log(Re\sqrt{\lambda}) - 1.176$ Hi-Reff(Furuichi, 2015) $\dots (E)$

流量値を計測し、静的秤量法²²⁾により得られた流量値と比較している。この実験結果を元に、2つの異なる配管における流速変換係数の偏差 E_k を求めたものが図4に示されている(図4黒丸)。内面がより粗い炭素鋼管では一般スチール配管よりも参照流量から求められる流速変換係数の値が大きくなる。また、その偏差はレイノルズ数とともに増大する。この結果は、例えば一般スチール配管が経年劣化により炭素鋼管程度の粗さになった時、その粗さを考慮せずに元の流速変換係数から流量値を算出してしまうと、 $Re=1.4 \times 10^6$ では0.62%流量を過大評価してしまうことを示している。このように、超音波流量計においては、内面粗さを考慮したうえで流量を計測することは重要であるが、市販の超音波流量計で実際に粗さのパラメーターを組み込んでいるものは現状としては非常に少ない。なお、図4における理論値については、4.3節において改めて解説する。

4.2 粗さを考慮した流速変換係数 k_{uf} の算出

粗さのパラメーターについては、流速変換係数に組み込むことが可能である。粗さが流れに影響しないような表面を滑面、粗さが流れに影響を及ぼす表面を粗面という。3章で解説したビルゲルの式(4)やブラジウスの式(5)は配管内面が流体力学的に滑面であることを仮定して導出されている。一方、粗面においては、粗さ要素を k_s (4.3節にて詳説)とした時に、この粗さのパラメーターを組み込んだ管摩擦係数の式が提案されており、次のColebrook(1939)の式(20)やColebrook-White(1937)の式(21)などが知られている。

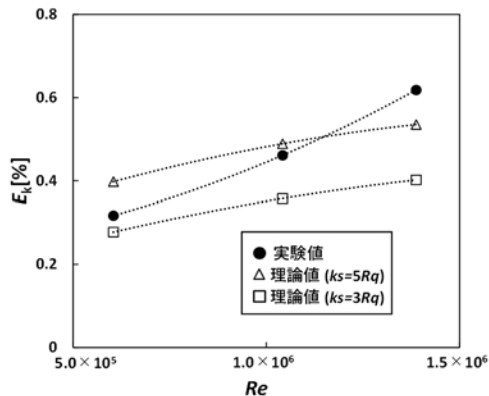


図4 一般スチール配管から炭素鋼管配管に対する流速変換係数の偏差 E_k ²⁹⁾
 一般スチール配管: $R_q=0.003$ mm, $D=390$ mm
 炭素鋼管: $R_q=0.019$ mm, $D=390$ mm

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.0 \log \left(\frac{k_s}{3.71D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (20)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.0 \log \left(\frac{k_s}{D} + \frac{9.34}{Re\sqrt{\lambda}} \right) + 1.14 \quad (21)$$

Colebrookの式(20)は規則的かつ人工的な粗さをもつ配管により実験的に求められ³⁰⁾、Colebrook-Whiteの式は自然な粗さを有する一般配管を用いて求められた式である³¹⁾。また、レイノルズ数が高くなると、管摩擦係数はレイノルズ数に依存せず一定値となる。このときの状態を「完全粗面」と表現する。完全粗面における管摩擦係数はNikuradseにより次式(22)が提案されている³²⁾。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.0 \log \left(\frac{k_s}{D} \right) + 1.14 \quad (22)$$

これらの式を用いることにより流速変換係数を求めることができる。

ここで、一般配管の粗さを考慮した流速変換係数を求めるためにColebrook-Whiteの式(21)を一例として用いる。ビルゲルの式(4)を導出する際に途中で得られる次式(23)の管摩擦係数にColebrook-Whiteの式(21)から得られる管摩擦係数の値を代入することで、粗さのパラメーターを組み込んだ流速変換係数を求めることができる。

$$k_{uf} = 1 + 1.25 \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \quad (23)$$

この式から求められる粗さごとの流速変換係数を図5に示す。滑面配管で示されている流速変換係数はビルゲルの式(4)より求めた値である。実際の現場では粗さの影響がない滑面や、逆に $k_s/D > 0.02$ の過度な粗さを有する場合は少なく、 $k_s/D < 0.02$ 程度の粗さを有する場合はほとんどである。図5からわかるように低レイノルズ

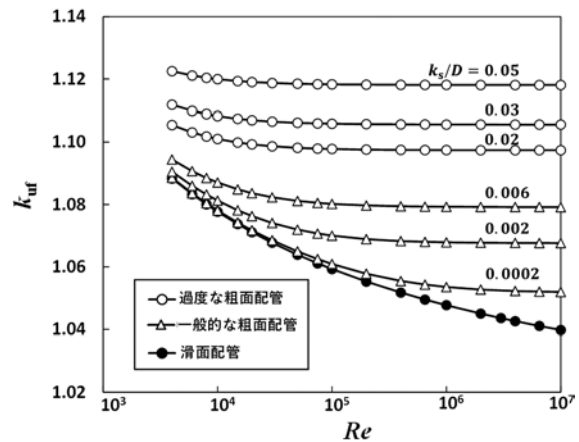


図5 内面粗さごとの流速変換係数 k_{uf} のレイノルズ数特性

数では滑面と一般的な粗面配管と比較して、粗さを考慮しても流速変換係数 k_{ur} の値には大きく影響しないことが分かる。しかしながら、発電プラントにおいて見られるような高レイノルズ数域 ($Re > 10^6$) になると、粗さを考慮するか否かで流速変換係数が大幅に変わってしまうことが分かる。これはレイノルズ数が高くなるほど、流速分布が粗さの影響を強く受けるためである。例えば、 $Re = 10^7$ の $k_s/D = 0.006$ の粗さを有する配管において、粗さを考慮せず滑面と仮定し、ビルゲルの式 (4) から流速変換係数を求めると、流量が 3.8 %ほど大きく見積もられることになる。以上のように、超音波流量計を用いた流量計測において、粗さのパラメータを考慮して流量値を求めることは非常に重要な要素のひとつである。

4.3 粗さの定義化

粗面における管摩擦係数から、流速変換係数を求めて超音波流量計の高精度化を行う場合にはいくつかの課題が存在する。その一つが粗さ要素 k_s の定義方法である。粗面の管摩擦係数算出式に含まれる粗さ要素 k_s は等価粗さと呼ばれるパラメータで、これは Nikuradse により行われた実験において定義されたものである。Nikuradse は配管内面に等しい径をもつ砂粒を全面に張り付け、この配管で管摩擦係数を計測した。このときの砂粒の直径を等価粗さ k_s と定義したのである³²⁾。この等価粗さ k_s が Nikuradse の式 (22) 以外にも、Colebrook の式 (20) や Colebrook-White の式 (21) の式に適用されている。しかしながら、実現場で用いる配管はこのような人工的な等しい大きさの粗さを有しているわけではなく³³⁾、実際はよりランダムである。実配管における粗さの計測では、算術平均粗さ R_a や最大高さ粗さ R_z 、二乗平均平方根粗さ R_q などの粗さパラメータが用いられるため、これらの値を用いて等価粗さを推定することが一般的であるが必ずしも十分ではない³⁴⁾。どの粗さパラメータが等価粗さ k_s として定義できるかは古くからの課題のひとつである^{33), 35)}。

例えば、一般スチール配管と炭素鋼鍍管の実際の粗さ計測から得られた R_q の値を用いて $k_s = 3R_q$ もしくは $k_s = 5R_q$ と仮に定義して、4.2 節で解説した方法により流速変換係数を求める。ここで得られた一般スチール配管と炭素鋼鍍管の流速変換係数の偏差を図 4 に示している (白三角および白四角)。図に示されるように、 $k_s = 5R_q$ と仮定して計算した理論値は実験値と比較的良く一致する。この結果は、4.2 節で解説した流体力学的観点により粗さのパラメータを流速変換係数に組み込んで流量

値を補正する方法が実流動場に適用しうる可能性を示している。しかしながら、 $k_s = 5R_q$ と定義するか $k_s = 3R_q$ と定義するかによって偏差が異なっている点には注意しなくてはならない。Superpipe において粗面管の管摩擦係数を計測した研究では $k_s = 3R_q$ と論文中で定義している³³⁾。しかし、図 4 において、 $k_s = 3R_q$ よりも $k_s = 5R_q$ と定義して計算した結果の方が実験値との整合性が高いように見える。等価粗さ k_s をどのように定義するかは実現場において重要であるにも関わらず、非常に難しい課題となっている。

等価粗さ k_s が R_a や R_z , R_q で正確に定義できない場合、等価粗さ k_s 以外の粗さで一般配管の管摩擦係数の式そのものを再度定義する必要性もあることが考えられる。一般配管を用いて管摩擦係数のレイノルズ特性を計測したところ、工業界で最も汎用的に用いられている Colebrook の式 (20) と一致しないという先行結果も報告されている^{33), 35)}。このことから、一般配管における管摩擦係数を高精度に求められる式が必要であるといえる。このことは、粗面における超音波流量計の高精度化に繋がる要素のひとつとなる。

更に、もう一つの現実的な問題として、経年劣化などにより変化した内面粗さをどのように評価するかということが挙げられる。大口径の配管では特に、配管の取り外しが困難であるため、経年ごとの内面粗さの変化を知る術がない。ある材質における粗さの経年変化をあらかじめ調べておき、そのデータから推測するといった手法の検討も必要であると考えられる。

5. 流速分布の不均一性に関する不確かさ要因について

5.1 超音波流量計の上下流の制約条件

超音波流量計をはじめとして、差圧式流量計や電磁流量計、渦流量計などいくつかの流量計は上流および下流に一定以上の直管長を必要とする制約条件が設けられている¹⁾。これは上流や下流に存在する曲がり管などの条件によって管内の流速分布に非対称性や旋回流が発生し、それが流量計測に影響するためである。図 6 に各流量計の必要直管長を示す。超音波流量計は $15D$ (配管径 D の 15 倍の長さ) と他の流量計以上に長い直管長が必要とされており、上流の影響および流速分布の不均一性の影響を強く受ける可能性がある。

3 章において理想状態の流速分布式が定まっていないことが流量計測に及ぼす影響について説明したが、実流動場ではそのような理想状態はほとんどない。そのために、粗さや上流条件といった現場ごとに異なるパラメー

ターについて議論することは、超音波流量計のオンサイトキャリブレーションへの利用に向けて非常に重要である。4章で超音波流量計による計測において粗さのパラメーターを考慮する手法について述べた。粗さに関してもまだ課題はあるものの、流体力学的視点から、粗さを考慮した流量の算出は可能である。しかしながら、上流条件に関しては、曲がり管の数や角度などその条件は無数にあり、流れ場ごとに異なる上流条件をパラメーターとして組み込んで流量値を補正することは非常に困難である。超音波流量計は測定線上の平均流速を計測し流量を算出することから、特に上流の影響がキャンセルされるであろう直管長の制約は強い。近年は複数の測定線による計測から、この影響を小さくすることができる超音波流量計が市販されるようになってきている。しかしながら測定線を増やすことにはコストやスペース等の限界があり、必ずしも完全に流速分布の影響を消すことはできない。したがって、超音波流量計で高精度に計測を行うには、十分な直管長を設けることが現実的な解となる。しかしながら、メーカーによる仕様書や文献によって直管長の制約条件が異なっているのが現状で、「どの程度の直管長を設ければ十分であるのか？」という問いに対しては、より注意深い検討が必要である。多くの流動場において目的の精度で流量計測を行うには超音波流量計における上流の影響を評価し、制約条件の再検討が必要であると考えられる。

5.2 上流条件による計測への影響

超音波流量計計測における上流の曲がり管による計測誤差について、数値計算による結果を報告した例がある³⁶⁾。この報告によると、上流の曲がり管から流量計までの距離が短い程計測誤差が増大し、距離が長い程計測誤差が小さくなる。また、15Dの直管長を設けても、条件によっては、4%以上の計測誤差を生じることを示している。図6の元になる文献では制約条件を15Dと示しているのに対し、この研究では15Dより長い直管長が必

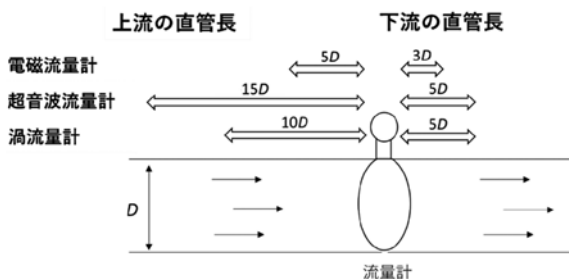


図6 各流量計の直管長制約条件¹⁾

要であることが示唆されている。しかし、この報告におけるレイノルズ数は $Re=1 \times 10^5$ 程度であるため、今後は実験的にかつ、より高レイノルズ数において上流条件の超音波流量計計測への影響を評価していく必要がある。

5.3 上流制約条件の再検討

実験的に上流の影響を評価する場合、高レイノルズ数条件であるほど、上流配管のレイアウトを変えて実験することは大がかりになり困難をとまう³⁷⁾。そのため、このような実験のひとつとして、上流の影響をドップラー式超音波流量計において調べた結果が報告されている^{38), 39)}。この研究では上流に実際の曲がり管をレイアウトするのではなく、半月状に開口された障害板(半月板)を用いることにより流速分布の影響を調査している(図7)。この実験では半月板の枚数、設置角度、流量計からの位置 L を変更することにより、様々な上流の条件を模擬している。図8にドップラー式超音波流量計による管内の流速分布の計測結果を示す。図8(a)から(c)は流量計の上流 $L=8D$ の位置に各条件で半月板を設置した際の流速分布の計測結果を、図8(d)から(e)は $L=25D$ の時の結果を示している。ここで示されるように、障害板から流量計までの距離が短い程、流速分布に非対称性が確認され、距離が長くなるにつれて軸対称的な流速分布となっていくのが分かる。

このような障害板を用いた実験手法を伝搬時間差式超音波流量計にも適応することで、上流条件による流量計測への影響評価と、上流の制約条件の再検討が可能であると考えられる。この手法では、実際に大掛かりな配管

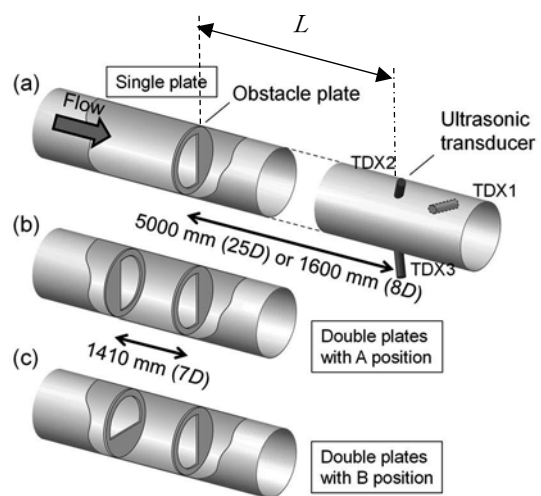


図7 超音波ドップラー法を用いた実験概略図³⁹⁾

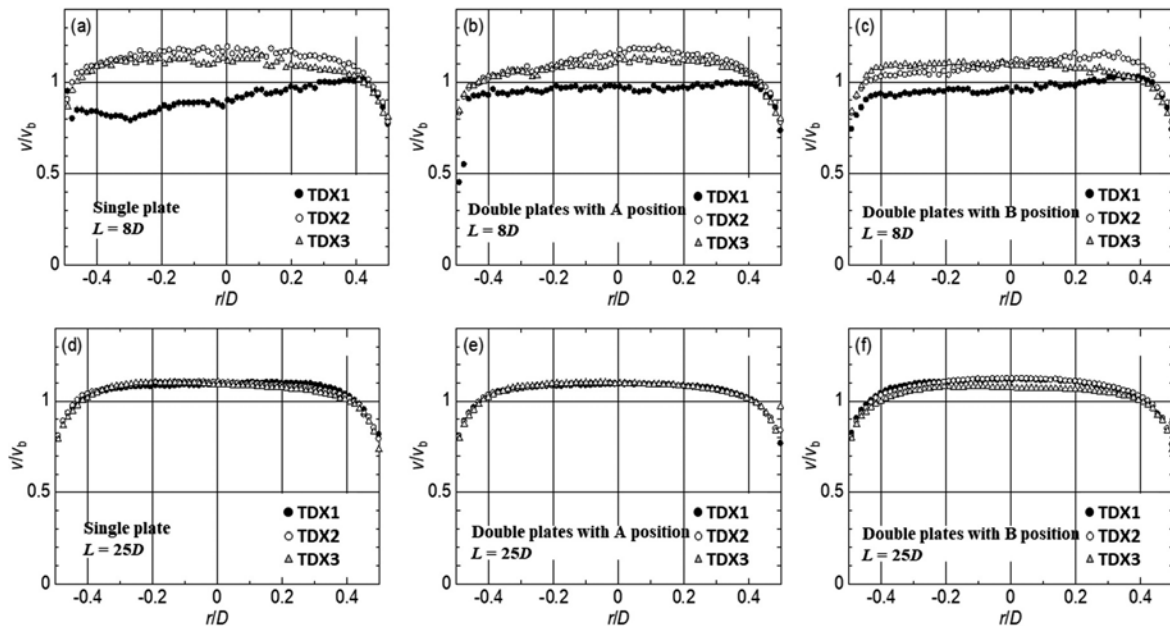


図8 障害板によるドップラー流速分布計測への影響 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{h}$ (一部改変)³⁹⁾

レイアウトを変更する必要がなく、プレートが既存配管の間に挟むのという作業のみのため比較的簡便に実施することができる。これを、Hi-Reffにおける600 mmの大口径試験ラインで実施することで、実プラントレベルでの影響を評価することができる。

6. まとめと展望

本調査において、高レイノルズ数条件の流動場は産業界において非常に多いにも関わらず、適応可能な流量計は限られることがわかった。超音波流量計はそれらの条件下で最も有用とされている流量計である。また、クランプオン型であれば、実現場において参照流量計として用いることでオンサイトキャリブレーションができる可能性を有している。しかしながら、超音波流量計の精度は十分であるとはいえず、高精度化に向けた検討が必要であると考えられる。本報告では、超音波流量計の不確かさ要因として管内流に関する不確かさ要因が最も大きいことを示した。管内流に関する不確かさとは、1. 流速変換係数(理想状態の流速分布)、2. 内面粗さ、3. 上流条件による流れの不均一性などに起因する。

超音波流量計の高精度化に向けた今後の展望として、主に3つの研究を進める必要があると考えている。1つ目は滑面の流速分布式の高精度化である。これにより、

超音波流量計の原理に関わる理想状態での不確かさを明らかにすることが可能となる。流速分布式の高精度化のために、Hi-Reffを用いて流速分布式に含まれる定数のレイノルズ数依存性調査や流速計測に関わる計測機器の空間分解能による影響評価等を今後行っていく予定である。2つ目は、粗面の流速分布式の高精度化および粗さの定義化である。これには新たな粗さのパラメータを超音波流量計測に組み込むことで、粗さについての補正方法の確立の可能性を検討するものである。3つ目は、上流条件を変えた場合の影響評価を行う。実プラントと同程度の口径において流速分布に変化をつけた状態で超音波流量計による計測を行う。これにより超音波流量計で計測する際の上流の制約条件を明確にすることができる。

本調査研究では管内の流速分布という観点から超音波流量計の高精度化への道を探った。調査の中で、流量計の高精度化には技術的な要素だけでなく、計測対象としている流体の性質そのものをより深く理解することも重要であると感じた。これまで、対象は同じであるのにも関わらず、流量計測と流体力学は切り離して考えられがちであった。しかしながら、流体力学的な知見、特に高レイノルズ数条件での知見が乏しいことが高精度流量計測の妨げとなっているのは事実である。本質的な流量計の高精度化には流れを詳細に理解するという視点は今後

も重要であるだろう。

謝辞

本調査研究を行うにあたり，工学計測標準研究部門液体流量標準研究グループの古市紀之グループ長をはじめ，液体流量標準研究グループの皆様に数々のご指導，アドバイスを頂きましたこと，厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本計量機器工業連合会社団法人. 流量計測 A to Z. 5-6 (工業技術者, 1995).
- 2) 発電専門委員会. 超音波法による水車流量測定について. 電気学会技術報告 1 部 35-51 (1969).
- 3) 佐鳥聡夫. 第四回 超音波流量計. MS TODAY 10 月号 (2001).
- 4) 和田守弘, 古市紀之, 嶋田隆司. UVP による流量計測の不確かさ評価研究. 可視化情報学会誌 (Vol.36 No.142) (2016).
- 5) 流量計現地校正の特長. 島津システムソリューションズ株式会社. <https://www.shimadzu.co.jp/sss/flow/outline/onsite.html>. (accessed Jan. 16, 2021)
- 6) Takeda, Y. Ultrasonic Doppler method for velocity profile measurement in fluid dynamics and fluid engineering. *Exp. Fluids* **26**, 177-178 (1999).
- 7) Ohkubo, T., Takeda, Y. & Mori, M. Accuracy Evaluation of High-accuracy Flowmeter using UVP. *Trans. Japan Soc. Mech. Eng. Ser. B* **72**, 81-89 (2006).
- 8) 矢尾博信, 平山紀友, 大室善則. ハイブリッド超音波流量計. 富士時報 (Vol.77 No.4 432-435) (2004).
- 9) 佐々木アズビル株式会社, 技術開発本部宏 & Sasaki, H. クランプオン超音波気体流量計の開発 Development of a Clamp-on Ultrasonic Flowmeter for Gas. (2015).
- 10) 吉山裕二. 超音波流量計による計測. 計測と制御 (5 巻 7 号 524-531) (1966).
- 11) Edtrada, H. *Technical Paper Identifying and bounding the uncertainties in LFM flow measurements*. (2000).
- 12) Cheon Jung, J. & Hyun Seong, P. *Estimation of the Flow Profile Correction Factor of a Transit-Time Ultrasonic Flow Meter for the Feedwater Flow Measurement in a Nuclear Power Plant. IJ IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE* vol. 52 714-718 (2011).
- 13) 日野幹雄. 流体力学. 316-317 (朝倉書店, 1992).
- 14) Kim, J. Progress in pipe and channel flow turbulence, 1961-2011. *J. Turbul.* **13**, 1-19 (2012).
- 15) Birger, G. I. Certain problems in calibrating ultrasonic flowmeters. *Meas. Tech.* **5**, 872-874 (1962).
- 16) Laws of Turbulent Flow in Smooth Pipes. By G. Nikuradse. (Forschungsheft, No. 356.) V.D.I Verlag, Berlin. R.M. 5 (in German). *J. R. Aeronaut. Soc.* **36**, 1050-1050 (1932).
- 17) Blasius, H. Das Aehnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten. in *Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens* 1-41 (Springer Berlin Heidelberg, 1913). doi:10.1007/978-3-662-02239-9_1.
- 18) 水車およびポンプ水車の効率試験方法 (電気学会電気規格調査会標準規格, JEC-157, 99-98). (電気書院, 1981).
- 19) Zagarola, M. V. & Smits, A. J. Mean-flow scaling of turbulent pipe flow. *J. Fluid Mech.* **373**, 33-79 (1998).
- 20) Furuichi, N., Terao, Y., Wada, Y. & Tsuji, Y. Friction factor and mean velocity profile for pipe flow at high Reynolds numbers. *Phys. Fluids* **27**, 095108 (2015).
- 21) Prandtl, L. Ein Gedankenmodell für den Zerreißvorgang spröder Körper. *ZAMM - J. Appl. Math. Mech. / Zeitschrift für Angew. Math. und Mech.* **13**, 129-133 (1933).
- 22) Furuichi, N., Sato, H., Terao, Y. & Takamoto, M. A new calibration facility for water flowrate at high Reynolds number. *Flow Meas. Instrum.* **20**, 38-47 (2009).
- 23) Furuichi, N., Terao, Y., Wada, Y. & Tsuji, Y. Further experiments for mean velocity profile of pipe flow at high Reynolds number. *Phys. Fluids* **30**, 055101 (2018).
- 24) Willert, C. E. *et al.* Near-wall statistics of a turbulent pipe flow Willert, C. E., Soria, J., Stanislas, M., Klinner, J., Amili, O., Eisfelder, M., Cuvier, C., Bellani, G., Fiorini, T., & Talamelli, A. (2017). Near-wall statistics of a turbulent pipe flow at shear Reynolds num. *J. Fluid Mech.* **826**, (2017).
- 25) Örlü, R. *et al.* Reynolds stress scaling in pipe flow turbulence - First results from CICLoPE. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **375**, (2017).
- 26) Fan, Y., Arwatz, G., Van Buren, T. W., Hoffman, D. E. & Hultmark, M. Nanoscale sensing devices for turbulence measurements. *Exp. Fluids* **56**, (2015).
- 27) 森治嗣. 高精度超音波流速分布流量計の開発. IEEJ (Vol.124 No.2 102-105) (2004).
- 28) Calogirou, A., Boekhoven, J. & Henkes, R. A. W. M.

- Effect of wall roughness changes on ultrasonic gas flowmeters. *Flow Meas. Instrum.* **12**, 219-229 (2001).
- 29) Furuichi N, Sato H, Terao Y, T. M. Effect of Surface Roughness of Pipe Wall for Transit Time Ultrasonic Flowmeter. in (Proceeding of 6th ISFFM, (Querétaro, Mexico), 2006).
- 30) Colebrook, C. F. *et al.* Turbulent flow in pipes with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipes laws. *J. Inst. Civ. Eng.* **12**, 393-422 (1939).
- 31) Colebrook, C. F. Experiments with fluid friction in roughened pipes. *Proc. R. Soc. London. Ser. A - Math. Phys. Sci.* **161**, 367-381 (1937).
- 32) Nikuradse, J. LAWS OF FLOW IN ROUGH PIPES. *Natl. Advis. Comm. 3 Aeronaut.* (1933).
- 33) Langelandsvik, L. I., Kunkel, G. J. & Smits, A. J. Flow in a commercial steel pipe. *J. Fluid Mech.* **595**, 323-339 (2008).
- 34) 表面粗さ. *MITSUBISHI MATERIALS HP* http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mmc/ja/html/product/technical_information/information/surface_roughness.html. (accessed Jan. 16, 2021)
- 35) Shockling, M. A., Allen, J. J. & Smits, A. J. Roughness effects in turbulent pipe flow. *J. Fluid Mech.* **564**, 267-285 (2006).
- 36) Halttunen, J. Installation effects on ultrasonic and electromagnetic flowmeters: a model-based approach. *Flow Meas. Instrum.* **1**, 287-292 (1990).
- 37) Furuichi, N., Terao, Y. & Takamoto, M. Actual flow calibration of a feedwater flowmeter using a high Reynolds number facility at NMIJ. *Nucl. Eng. Des.* **239**, 1304-1313 (2009).
- 38) Wada, S. & Furuichi, N. Influence of obstacle plates on flowrate measurement uncertainty based on ultrasonic Doppler velocity profile method. *Flow Meas. Instrum.* **48**, 81-89 (2016).
- 39) Furuichi, N. An influence of obstacle plate for uncertainty of flowrate measurement using ultrasonic Doppler method. in (Proceedings of 9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, 2014).