

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 25 日現在

機関番号：14501
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2014～2016
課題番号：26420113
研究課題名(和文) 速度拡張アルゴリズムを導入した超音波パルスドップラ法による高精度流量計の開発

研究課題名(英文) Development of a flowmeter by using ultrasonic pulsed Doppler method with a de-aliasing method

研究代表者
村川 英樹 (Murakawa, Hideki)
神戸大学・工学研究科・助教

研究者番号：40467668

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：超音波パルスドップラ法を用いた速度分布計測において、二周期法に基づく速度拡張アルゴリズムを導入した。流量算出誤差に大きく影響する壁面近傍での計測の不確かさを低減することを目的とし、マルチウェイ超音波法を導入した。本手法では、測定体積が小さい高周波数で壁面近傍の速度分布を計測し、基本周波数の低い超音波でセンサから遠い領域を計測した。得られた速度分布を組み合わせることで、従来の手法に比べて6倍程度の高流量を高精度に計測可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：A de-aliasing based on the dual PRF, pulse repetition frequency, method was introduced for ultrasonic pulsed Doppler method. Furthermore, a multi-wave ultrasonic method was proposed for the measurement. The higher ultrasonic basic frequency, f_0 , with smaller beam diameter, DUS, was used for measuring velocity profile near wall region, and the lower f_0 with larger DUS was used for measuring velocity profile far from the transducer. For integrating the combined velocity profiles over the pipe, it was shown that the approximately 6 times larger flowrate was accurately obtained compared to by using the conventional pulsed Doppler method.

研究分野：混相熱流体

キーワード：流量 速度分布 超音波 パルスドップラ法

1. 研究開始当初の背景

伝播時間差式 (TOF) 超音波流量計は、既存配管 (クランプオン型) や不透明流体にも適用可能であることから、広く工業プラントに用いられている。TOF では超音波センサ間の遅れ時間から流量を求めるために補正係数 (PF) が必要であり、経年変化や流量計の取り付け精度によって測定精度が大幅に低下することが知られている。一方、流速分布式超音波流量計は、超音波パルスドップラ法 (UDM) で得られた流速分布を周積分して流量算出しているため、TOF で必須な補正係数を必要としない。さらに複数の測定線を用いることで、曲がり配管直後など偏流のある場所でも高精度流量計測が可能であることが示されてきた。しかしながら UDM には超音波の基本周波数、繰り返し周波数などによって決定される速度限界が存在し、速度限界を超えた速度成分は速度の折り返し (エイリアシング) が生じる。この速度限界は測定範囲を広く設定するほど低下する。UDM による計測では、超音波の測定線方向の速度成分を計測するため、主流速度の投影成分が速度エイリアシングを生じないようにセンサ設置角度を調整する必要がある。しかしながら TOF と UDM によるハイブリッド型超音波流量計では、TOF による計測が最適なセンサ設置角度で固定され、センサ設置角度を任意に変更することができない。なわち、TOF による最大計測可能流量の 1/10 程度までの低流量のみ UDM による計測が可能である。また UDM では流路各位置で生じた反射信号を解析するため、TOF に比べて S/N による影響を受け易く、センサから遠い位置では計測精度が低下し、クランプオン型センサでは配管内における多重反射による流路壁面近傍の計測精度低下も課題とされている。

2. 研究の目的

超音波パルスドップラ法において、二周期法を応用したアルゴリズムによる速度拡張手法を導入し、その有効性について検証する。これにより現状に比べ数倍程度速い速度成分を高精度に計測可能な超音波パルスドップラ法を確立し、流速分布式超音波流量計に適用することで、高流量まで計測可能な流速分布式超音波流量計の開発と実機適用性に関する研究を実施するものである。また本研究では、流速分布式超音波流量計と従来の伝播時間差式超音波流量計を組み合わせることを前提とし、偏流や経年劣化による影響を受けにくい、高精度な流量計測が行えるシステムを開発する。

3. 研究の方法

(1) 二周期法では、超音波パルスを不等間隔 (T および $T+T_s$) で送波することにより位相差の差を演算する方法である。この手法では、 T_s が小さいほど計測可能な速度が拡張されるが、超音波の送信ジッタの影響が T_s の低

下に伴い大きくなる。更に超音波の繰り返し回数の増加に伴うノイズ低減の影響が小さく、大幅な速度拡張は現実的に困難である。そこで、二周期法を基に新たなアルゴリズムを検討し、従来手法では困難な速い流れ場での計測手法を構築した。

(2) 壁面近傍における計測精度向上手法の開発

パルスドップラ法による速度分布計測では、計測の測定体積が比較的大きい。特に速い流れ場を計測する場合、反射体粒子の移動速度と超音波パルスの繰り返し周期を考慮し、測定体積をより大きくする必要がある。その場合、速度勾配の大きな壁面近傍では、特に計測の不確かさが大きくなる。そこで従来から考案してきたマルチウェイブ超音波法を導入し、壁面近傍の狭い領域のみ高い周波数にて高精度に速度分布を計測し、センサから遠い流路中心部については、測定体積の大きな低い基本周波数によって計測する手法を提案した。

(3) 実機適用性の検証

構築したアルゴリズムおよび計測手法の実機適用性を検証するため、産業技術総合研究所所有の高レイノルズ数大型実験流路を用いて、速度分布計測を実施した。計測した速度分布を周積分することで流量を算出し、秤量タンクおよび参照流量計における流量計測値と比較することで、本手法の有効性を示した。

4. 研究成果

(1) 速度拡張法の構築

計測可能な最大速度を拡張する手法として、複数の周期で超音波パルスの送受信を行うスタガトリガ法がある。本手法は気象レーダなどにおいて用いられている。二つの周期を用いる二周期法では、周期 T における二つの反射波の位相差 $\Delta\theta_1$ 、周期 $T+T_s$ による反射波の位相差 $\Delta\theta_2$ は、ドップラ周波数 f_d を用いてそれぞれ以下の式で表される。

$$\Delta\theta_1 = 2\pi f_d T \quad (1)$$

$$\Delta\theta_2 = 2\pi f_d (T + T_s) \quad (2)$$

よって、これらの式より位相差の差 $\Delta\Delta\theta$ は

$$\Delta\Delta\theta = \Delta\theta_2 - \Delta\theta_1 = 2\pi f_d T_s \quad (3)$$

となり、速度 v は音速 c を用いて

$$v = \frac{c \cdot \Delta\Delta\theta}{4\pi f_0 T_s} \quad (4)$$

となる。ここで $-\pi < \Delta\Delta\theta \leq \pi$ より、計測可能な最大速度 v_{\max} は、

$$v_{\max} = \frac{c}{4f_0 T_s} \quad (5)$$

となる。速度拡張法を用いない従来手法の場合の最大速度は、

$$v_{\max} = \frac{c}{4f_0 T} \quad (6)$$

となるため、二周期法では従来手法に比べ、同一の計測可能最大距離 L_{\max} において、最大速度が T/T_s 倍されることが分かる。

図1に、流量 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{h}$ 、一つの速度を算出するのに用いたパルス数 $N_{\text{pulse}} = 512$ (時間分解能 $\Delta t = 276 \text{ ms}$)、 $T = 0.5 \text{ ms}$ 、 $T_s = 0.08 \text{ ms}$ 、超音波測定線方向の計測分解能 $\Delta L = 2.96 \text{ mm}$ に設定し、二周期法を用いて計測した結果を示す。実線は指数法則による速度分布を示す。なお、 $T = 0.5 \text{ ms}$ として従来手法によって計測可能な主流流速は、 1.08 m/s である。二周期による瞬時速度分布は、従来手法に比べ速い速度が計測されているものの指数法則と大きく異なり、計測誤差が大きいことが確認できる。これは式(3)に示すように、従来手法に比べて速度算出時の演算回数が増加することで、ノイズによる誤差が大きく生じたためである。

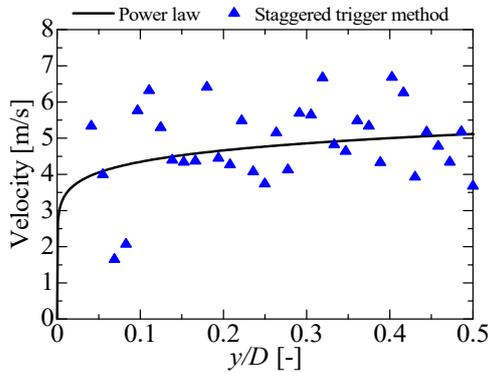


図1 二周期法による円管内速度分布計測例 ($Q = 500 \text{ m}^3/\text{h}$)

そこで、二周期法によって速度算出した結果を指標とし、従来手法による速度エイリアシングを補正する手法を導入した。まず、従来手法によって速度を求める。二つの周期によって送受信した波形から、粒子の移動に伴って生じる平均位相角は、

$$\overline{\Delta\theta} = \frac{(\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2)}{2} \quad (7)$$

で求めることができる。平均位相角に対応する速度を v とする時、最大速度 v_{\max} を超える速度を計測した場合、速度エイリアシング (折返し) が生じる。この折返し回数を m とすると、真の速度 v_{real} は以下の通りとなる。

$$v_{\text{real}} = v + 2mv_{\max} \quad (8)$$

二周期法による速度算出値 v_{stg} から、以下の式を満たす m を用いて、速度補正を行った。

$$v_{\text{stg}} - v_{\max} < v_{\text{real}} \leq v_{\text{stg}} + v_{\max} \quad (9)$$

以上のアルゴリズムを用いて計測した結果が、図2である。流路の多くの場所で、指数法則による速度分布と良い一致をするものの、一部で大きく速度がずれていることが確認できる。これは、二周期法による速度データの誤差が大きく、折返し回数 m を誤判定

したためである。

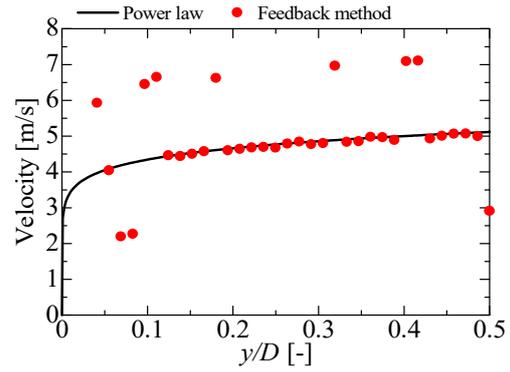


図2 補正手法による円管内速度分布計測例 ($Q = 500 \text{ m}^3/\text{h}$)

従来提案されていた手法では、折返し回数の誤判定が多いことが分かった。そこで本研究では、新たに二周期法によって得た速度分布に対して、空間的に移動平均を施すことで、折返し回数の誤判定を低減する手法を導入した。すなわち、二周期法によって得た速度に、以下の式によって移動平均を行った。

$$v_{\text{stg}} = \frac{v_{1,i-n} + \dots + v_{1,i} + v_{1,i+(n-1)} + v_{1,i+n}}{(2n+1)} \quad (11)$$

図1の速度分布に移動平均を行い、その速度分布を指標とし、従来手法によって算出した速度分布に対して速度エイリアシングを補正した結果 (補正手法) を図3に示す。それぞれ、 $n = 1 \sim 3$ とした結果である。移動平均を行うことで大幅に精度が向上していることが分かる。しかしながら $n = 3$ では、壁面近傍の速度勾配の大きな領域では精度が低下しており、 $n = 2$ として本手法を用いることで、定常流に対して高精度に速度分布が計測可能であることを示した。

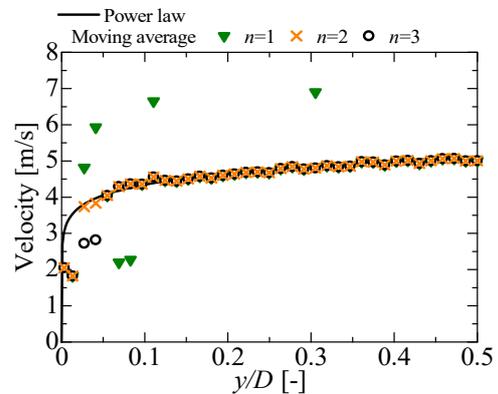


図3 移動平均を施した二周期法の速度分布を指標とした補正手法による速度分布

(2) 壁面近傍における計測精度向上手法の開発

計測における測定体積の概念図を図4に

示す。測定体積は、超音波ビームの直径 D_{US} と測定線方向の空間分解能 ΔL によって決定される円盤状となる。 D_{US} は音圧分布に依存することになるが、計測に用いたセンサにおいては、計測範囲での D_{US} はほぼ一定とみなすことができる。 ΔL は超音波パルスに含まれる波数 N に依存して、変化することができる。

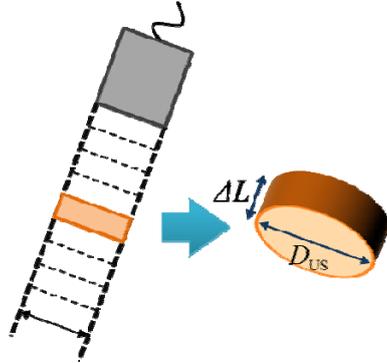


図4 測定体積の概念図

測定体積は、計測される速度に対する不確かさおよび、流量算出を行う際の離散誤差に影響する。

配管径 D の円管内流れにおいて、測定体積内における速度のアンサンブル平均 $\langle U(y) \rangle$ は以下ようになる。

$$\langle U(y) \rangle = U(y) + G \frac{\partial^2 U(y)}{\partial y^2} \quad (12)$$

ここで y, U はそれぞれ、壁面からの距離、軸方向の速度を表している。 $G > 0$ は測定体積の大きさと共に大きくなるパラメータである。式(12)の右辺第二項は常に負となるため、UDM では測定体積が大きいほど速度を過小評価することを示している。管内流においては、以下のベキ乗流速分布式が知られている。

$$U(y) = \frac{(n+1)(2n+1)}{2n^2} \frac{4Q}{\pi D^2} \left(\frac{2y}{D} \right)^{1/n} \quad (13)$$

ここで Q は流量であり、 n はレイノルズ数によって決まる。UDM で得られる速度分布 v_i は離散的であるため、式(12)に式(13)を代入し離散化することによって以下を得る。

$$v_i = \left(1 + \frac{1-n}{n^2} \frac{G}{(i \cdot \Delta L \cos \theta)^2} \right) U(i \cdot \Delta L \cos \theta) \quad (14)$$

θ は超音波の入射角であり、 v_i は $y = i \Delta L \cos \theta$ の位置での速度である。式(14)を周積分することによって測定体積大きさを考慮した流量を解析的に求められる。

$D = 200 \text{ mm}$ 、 $\theta = 20^\circ$ とし、 D_{US} 及び ΔL を変化させて、計測される流量の誤差を評価した結果を図5に示す。図より D_{US} 、 ΔL とともに小さいほど流量計測の誤差が小さいことがわかる。特に ΔL による影響が顕著であり、 ΔL が大きいほど、管内の測定点が少なくなるため、速度分布から流量を算出する際に用いる周積分において、離散化による誤差が大きく

なることが分かる。

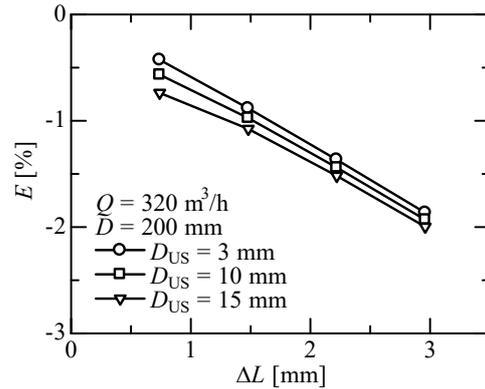


図5 D_{US} 、 ΔL による流量計測誤差への影響

流量の算出においては、速度勾配が大きい壁面近傍の領域での速度計測誤差が、流量算出誤差に大きく影響する。そこで、壁面近傍においてのみ ΔL を小さくする手法として、マルチウェイブ超音波法の導入を提案した。図6にマルチウェイブ超音波センサの概要図を示す。本センサは中心に直径 3 mm 、 $f_0 = 8 \text{ MHz}$ の超音波素子を、その外側に外径 10 mm 、 $f_0 = 2 \text{ MHz}$ の同心円状の素子を配置したものであり、それぞれ独立して駆動可能である。本センサを用いることで、流路中心部までの広い領域については 2 MHz によって、壁面近傍の領域のみを D_{US} 、 ΔL を小さく設定可能な 8 MHz で計測することとした。

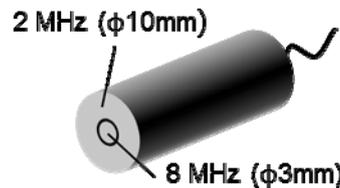


図6 マルチウェイブ超音波センサ

(3) 実機適用性の検証

開発した速度拡張アルゴリズムおよびマルチウェイブ法の実機適用性を検討するため、産業技術総合研究所の水流量校正設備で流量計測実験を行った。試験部は内径 $D = 200 \text{ mm}$ の水平円管であり、流れに対して $\theta = 20^\circ$ でマルチウェイブ超音波センサを接液で設置した。超音波の反射体として微小気泡を試験部の上流で注入しており、その直後に整流部を設けた。流量は気泡注入部の上流に設置された電磁流量計によって計測され、流量 $Q = 321.2 \text{ m}^3/\text{h}$ であった。水温は $21.5 \text{ }^\circ\text{C}$ で一定であり、音速は $c = 1480 \text{ m/s}$ である。測定体積の大きさの影響を評価するため、 ΔL を変化させた。本実験では2及び8 MHzによる計測は個別に行い、補正手法を用いて速度を算出した。

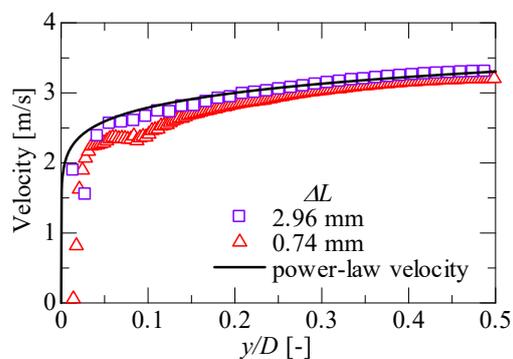
表1に実験における計測パラメータを示す。

T 及び $T + T_s$ は超音波パルスの送波周期である。2 MHz では 1000 個の瞬時速度分布を、8 MHz では 250 個の瞬時速度分布を平均して時間平均速度分布を算出した。

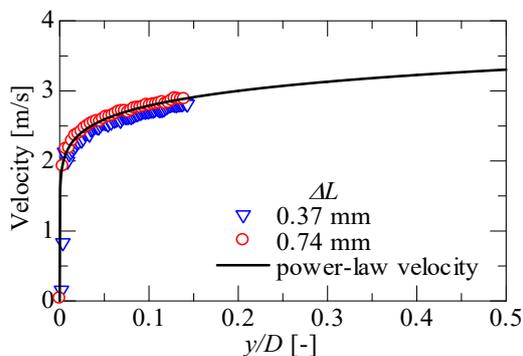
表 1 計測のパラメータ

f_0 [MHz]	T [ms]	$T + T_s$ [ms]	ΔL [mm]
2	0.5	0.583	0.74, 2.96
8	0.05	0.075	0.37, 0.74

図 7 に測定結果を示す。横軸はセンサからの距離を、縦軸は流れ方向の速度を表している。グラフ中の黒い実線はべき乗則によって求めた速度である。図 7(a) が示すように、 ΔL に関わらず、 $y/D < 0.15$ のセンサに近い領域では速度がべき乗側より低く計測されている。これはセンサが中空円状であることに起因する音圧分布の乱れによるものと考えられる。また、 $\Delta L = 0.74$ mm としたときの計測結果は、 $\Delta L = 2.96$ mm としたときの計測結果よりも速度が低くなっている。これは測定体積の大きさが計測する速度に対して十分でなかったためと考えられる。図 7(b) に 8 MHz のセンサによる計測結果を示す。8 MHz による測定では、送波周期が短いため $y/D < 0.15$ の領域における速度分布のみ得られている。 $\Delta L = 0.37$ mm では測定体積が小さいために正しく測定できなかったが、送波周期を短くすることによって測定体積の反射体の追従性を向上でき、 $\Delta L = 0.74$ mm で精度よく測定できた。



(a) 2 MHz センサによる速度分布



(b) 8 MHz による速度分布

図 7 マルチウェーブ超音波センサによる速度分布計測結果 ($Q = 321.2$ m³/h)

2 MHz では $\Delta L = 2.96$ mm、8 MHz では $\Delta L = 0.74$ mm とし、それぞれの速度分布をつなげた一例が図 8 である。ここで、8 MHz による計測距離を $y_{8\text{MHz}}$ とし、 $y_{8\text{MHz}}$ を変化させて求めた流量算出誤差を図 9 に示す。実線は理論的な流量算出誤差であり、丸プロットは通常の 2 MHz センサを用いて計測した結果を、四角プロットはマルチウェーブ超音波センサを用いて計測した結果を示す。

実線が示すように、理論的には壁面近傍 ($y/D < 0.025$) のみ測定体積を小さくすることが、流量算出誤差の低減には効果的であることが分かる。一般的な 2 MHz センサを用い、 $y_{8\text{MHz}}/D > 0.05$ とした結果において、流量算出誤差はほぼ理論値通りに一定となった。しかしながらマルチウェーブ超音波センサを用いた計測では、センサの中空形状に起因し、2 MHz センサによる壁面近傍の速度計測において不確かさが高くなるため、 $y_{8\text{MHz}}/D > 0.15$ と設定する必要があることが分かった。これにより、流量計測誤差を -1% 程度として計測可能である。さらにこの誤差は、計測に伴う系統誤差であり、流量算出時に考慮することで、実質的な不確かさは 0.5 % 以下であるといえる。これにより、従来手法に比べ約 6 倍程度の高流量を計測可能であることが確認された。

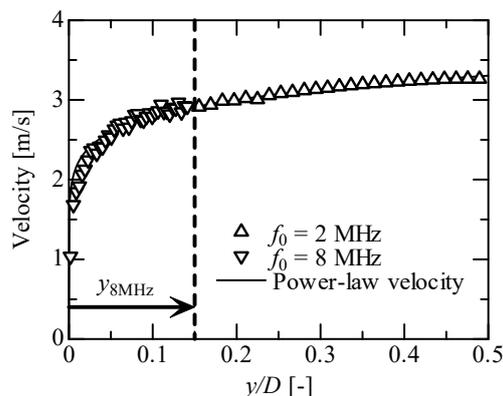


図 8 2 & 8 MHz による速度分布から求めた速度分布

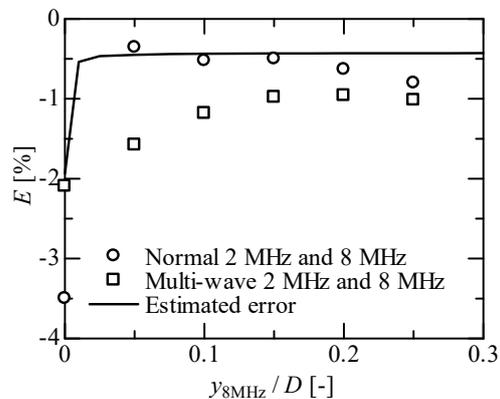


図 9 流量計測誤差の $y_{8\text{MHz}}$ による影響

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2件)

- ① H. Murakawa, E. Muramatsu, K. Sugimoto, N. Takenaka, N. Furuichi, A dealiasing method for use with ultrasonic pulsed Doppler in measuring velocity profiles and flow rates in pipes, Measurement Science and Technology, 査読有, Vol. 26, 2015, 085301 (11pp)
DOI: 10.1088/0957-0233/26/8/085301
- ② E. Muramatsu, H. Murakawa, K. Sugimoto, H. Asano, N. Takenaka, N. Furuichi, Multi-wave ultrasonic Doppler method for measuring high flow-rates using staggered pulse intervals, Measurement Science and Technology, 査読有, Vol. 27, 2016, 025303 (11pp)
DOI: 10.1088/0957-0233/27/2/025303

[学会発表] (計7件)

- ① E. Muramatsu, H. Murakawa, D. Hashiguchi, H. Asano, S. Wada, N. Furuichi, Influence of velocity distribution on accuracy of transit-time ultrasonic flow meter, 10th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (ISUD10), 2016.9.28, 東京工業大学 (東京都)
- ② D. Hashiguchi, H. Murakawa, E. Muramatsu, K. Sugimoto, N. Takenaka, N. Furuichi, Evaluation of measurement accuracy of a dealiasing method for use with ultrasonic pulsed Doppler, 10th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (ISUD10), 2016.9.28, 東京工業大学 (東京都)
- ③ E. Muramatsu, H. Murakawa, K. Sugimoto, N. Takenaka, A new method for high flow rate measurement using ultrasonic multi-wave pulsed Doppler method with staggered trigger, International Conference on Power Engineering-15 (ICOPE-15), 2015.12.3, パシフィコ横浜 (横浜市)
- ④ H. Murakawa, E. Muramatsu, K. Sugimoto, N. Takenaka, N. Furuichi, Development of ultrasonic flowmeter using pulsed Doppler method with staggered trigger pulse, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015, 2015.7.31, #2015-10137, ソウル (韓国)
- ⑤ H. Murakawa, E. Muramatsu, K. Sugimoto, N. Takenaka, N. Furuichi, Development of a dealiasing method in ultrasonic pulsed Doppler method for flowrate measurement, 9th International Symposium on Fluid Flow Measurement (ISFFM), 2015.4.15, アーリ

ントン (アメリカ)

- ⑥ H. Murakawa, A. Oue, E. Muramatsu, K. Sugimoto, N. Takenaka, N. Furuichi, Higher flowrate measurement using ultrasonic pulsed Doppler method with staggered trigger, 9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (ISUD-9), 2014.8.28, ストラスブール (フランス)
- ⑦ E. Muramatsu, H. Murakawa, K. Sugimoto, N. Takenaka, N. Furuichi, Improvement in measurement volume in near-wall region using ultrasonic multi-wave pulsed Doppler method for flowrate measurement, 9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (ISUD-9), 2014.8.28, ストラスブール (フランス)

6. 研究組織

(1)研究代表者

村川 英樹 (MURAKAWA, Hideki)
神戸大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 40467668

(2)連携研究者

古市 紀之 (FURUICHI, Noriyuki)
産業技術総合研究所・計測標準研究部・主任研究員
研究者番号: 10334921