

平成30年 5月31日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05566

研究課題名(和文)パルス超音波デコンボリューション法を用いたワイドレンジ流速分布過渡流量計の開発

研究課題名(英文)Development of the wide range velocity profile and flow rate measurement using pulsed ultrasound deconvolution method

研究代表者

和田 守弘(Wada, Sanehiro)

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・主任研究員

研究者番号：60738293

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、新たなパルス波形の生成と信号処理の適用、さらに、通常では適用が稀な高周波数センサの最適設計・製作、並びに超低雑音アンプの適用など、超音波の送受信及び信号処理の全てにおいてハードウェア・ソフトウェアの開発を行った。加えて、世界最高水準の高精度かつ安定した流量試験設備を利用してそれら開発した計測手法の実流・実証試験を実施した。これらにより、広範囲の流量条件にも適用可能な流速分布流量計測法の開発、並びに中長期の流量監視への適用が可能な極微小な超音波パルス伝搬経路間の遅れ時間差の測定手法の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：The wide range velocity profile and flow rate measurement methods are developed. To achieve the wider range of flow rate measurement, the new waveform of pulsed ultrasound and the new signal processing are applied to the conventional ultrasonic velocity profile measurement method. Additionally, the measurement technique to obtain the very short difference between the time of flights is developed for the long-term flow rate monitoring. These developed measurement methods are evaluated at the national standard facility of flow rate measurement.

研究分野：工学

キーワード：流量 超音波 流速分布

1. 研究開始当初の背景

原子力発電所をはじめとした発電プラントのより高度で安定した運転のためには設備の稼働状況の監視高度化が欠かせない。特に設備トラブルの直接的または間接的な要因となることの多い流体状態の主なパラメータである流量の監視は重要であり、短期・中期・長期にわたって監視可能な流量計測技術の開発が望まれている。現在、配管内流量を計測する手法としてタービン流量計、オリフィスやベンチュリなどの差圧式流量計、電磁流量計、コリオリ流量計、伝搬時間差式超音波流量計など多種存在し、それぞれの特徴、すなわち、流量範囲や不確かさ、流体の種類や温度圧力条件によって適正な手法が選択されている。しかしながら、代表的な流量計である電磁流量計や伝播時間差方式による超音波流量計は、一般的に配管内の流速分布に強い影響を受けるため実用場の流動条件が異なるために所定の精度が得られないケースが想定される。一方で、流速分布を直接計測することによる流量計測法も着目されてきた。この超音波流速分布計測法を利用した流量計測法は、配管内流速分布を周積分することを基本原理としており、流速分布が軸対称ではない流れ等に対しても高精度計測が期待されている。ただし、従来の超音波流速分布計測法は、測定レンジなどの測定原理上の制約や、トレーサ粒子が必要である点などから、広範囲の流量条件や中長期の流量監視への適用は難しかった。

2. 研究の目的

本研究では、設備改造等の負担が軽減可能な超音波を利用した流量計測技術に着目し、広範囲の流量条件への適用や、中長期の流量監視に適用可能な計測技術の実現可能性について検討することを目的とする。具体的には、流量レンジの拡大や測定精度の向上、さらに中長期的な流量監視手法への応用が期待できるトレーサ粒子を用いない新たな計測技術について実験的検討を行う。

3. 研究の方法

本研究は、超音波パルスの駆動方法やタイミング制御することにより、通常とは異なるパルス波形を生成、さらに信号処理の工夫など超音波の送受信及び信号処理の全てにおいてハードウェア・ソフトウェアの開発を行った。加えて、世界最高水準の高精度かつ安定した流量試験設備を利用してそれら開発した計測手法の実流・実証試験を実施した。これらにより、広範囲の流量条件でも適用可能な流速分布流量計測法の開発を行った。また、通常では適用が稀な高周波数センサの最適設計・製作、並びに超低雑音アンプの適用など上記とは別に新たなハードウェア・ソフトウェアの開発を行い、同様に実流・実証試験を実施した。これらにより、極微小な超音波パルス伝搬経路間の遅れ時間差の測定手

法の開発を行った。

4. 研究成果

(1) 半逆位相パルス適用による高度化

超音波時間領域相関法(UTDC: Ultrasonic Time-Domain Correlation method)の基本原理解および相互相関係数のサイドローブについて図1に示す。流体中に分布する超音波反射体に対して一定周期にて超音波パルスを送受信した場合、受信パルスは超音波伝搬方向の流速に依存した遅れ時間をもって検出される。そこで時刻で設定した参照窓と受信波形の相互相関係数を次式より得る。

$$R_k = \frac{\sum_{t=1}^n u_0(t) \cdot u_1(t)}{\sqrt{\sum_{t=1}^n u_0^2(t)} \sqrt{\sum_{t=1}^n u_1^2(t)}} \quad (1)$$

このとき、流量レンジ拡大に対して誤差要因となる相互相関係数のサイドローブは、超音波パルスが複数周期にて構成されていることに起因する。そこで超音波生成のための入力電圧信号をパルス途中で反転させることでサイドローブを低減可能な半逆位相パルスを生成する。

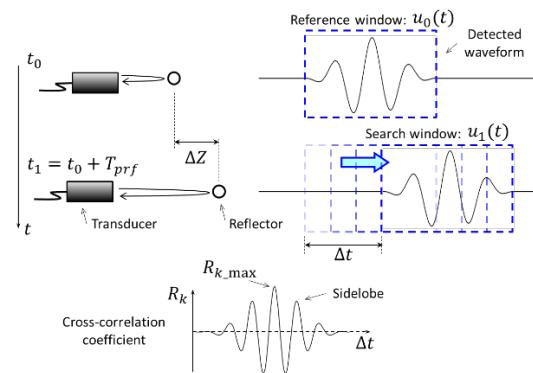


図1 超音波時間領域相関法

図2に通常パルスおよび半逆位相パルスを示す。超音波周波数は2MHzであり、振動子径は10mmである。図より、パルス後半で位相反転していることが確認できる。また、それぞれのパルスにて自己相関係数を求めた結果を図3に示す。サイドローブのピークが0.7程度から0.4程度に低減できていることがわかる。

半逆位相パルスの効果を実験的に検証するため、静的な秤量法によって校正された電磁流量計との比較による実流試験を実施した。試験には水流量の国家標準設備を用いており、静的な秤量法により与えられる参照流量の不確かさは0.060% (k=2)である。図4に試験装置および測定部の概略図を示す。サンプリング定理による流速範囲は次式により求められる。

$$v_{max} = \frac{c}{4f_0 T_{prf} \sin \alpha} \quad (2)$$

本試験は、この範囲を超えた流速にて試験を行うため、流量を  $400 \text{ m}^3/\text{h}$  に設定した。なお、配管内径は  $199 \text{ mm}$  である。水温は  $17.3 \pm 1.0$  であり、1 試験中の温度変化は  $0.1$  以下であった。超音波反射体としての微小気泡を測定部上流  $55D$  に設置した整流板上流より注入した。超音波入射角は  $19.7^\circ$  とした。通常および半逆位相パルスは同一の超音波パルサーレーザ (JPR-10CN, Japan Probe Co., LTD) にて送受信され、受信信号はデジタイザ (NI-5122, National Instruments Co.) を用いてサンプリングレート  $100 \text{ MHz}$  にて連続収録した。

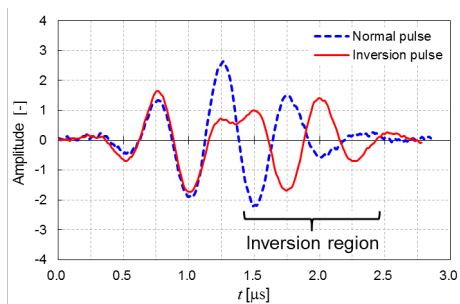


図2 超音波の通常パルスと半逆位相パルス

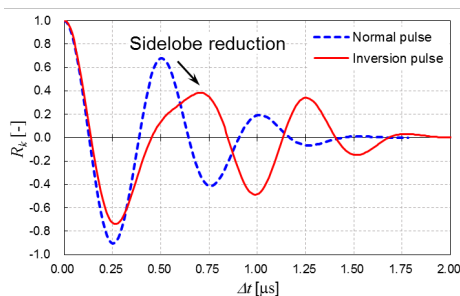


図3 通常パルスと半逆位相パルスの相関係数

実流試験により得られた時間平均流速分布を図5に示す。なお、一般的に UTDC ではパルス信号が未検出の場合や低い SN 比の信号を除去する目的で相関係数に閾値を設定しており、本計測結果は閾値  $R_{Th} = 0.7$  における結果を示している。図より通常パルスによって得られた流速分布は半逆位相パルスを用いたものより約 2% 程度低く計測されている。

流速分布より算出した流量は次式によって評価した。

$$E_Q = \frac{Q_{UTDC} - Q_{ref}}{Q_{ref}} \quad (3)$$

ここで、 $Q_{UTDC}$  及び  $Q_{ref}$  は UTDC 及び電磁流量計それぞれによって得た流量である。この結果、通常パルスを用いた場合は  $E_Q = -1.9\%$ 、半逆位相を用いた場合は  $E_Q = -0.1\%$  であったことから、半逆位相パルスの効果が確認できた。

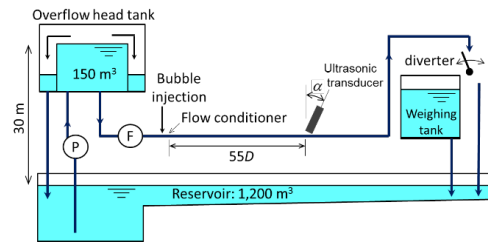


図4 実流試験装置概要

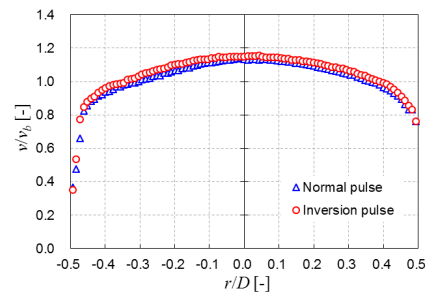


図5 平均流速分布 ( $R_{Th} = 0.7$ )

また、図6に相関係数閾値と流量精度のグラフを示す。図より相関係数の閾値が低下することにより、流量精度は流量に依存していることがわかる。図7は、本データにおける配管中心の流速の確率密度分布を流量条件  $200 \text{ m}^3/\text{h}$  および  $400 \text{ m}^3/\text{h}$  において示したグラフであり、 $R_{Th}=0.5$  または  $0.7$  のケースではサイドローブ誤検出による流速が明確に確認でき、この影響により  $E_Q$  が大きくなることがわかる。

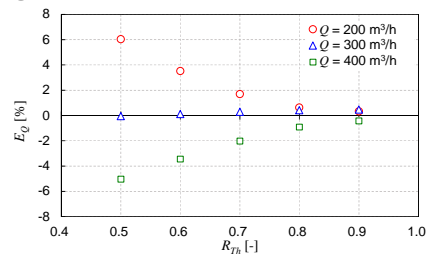
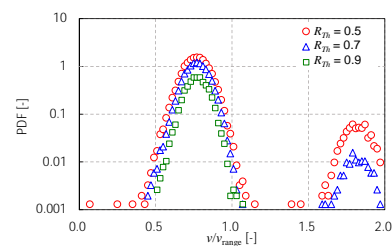
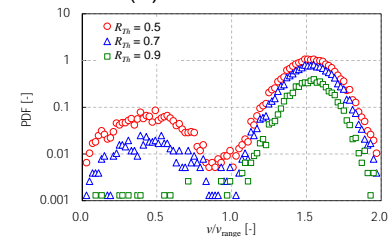


図6 相関係数閾値と流量精度



(a)  $Q=200 \text{ m}^3/\text{h}$



(b)  $Q=400 \text{ m}^3/\text{h}$

図7 配管中心における流速の確率密度分布

## (2) パルストレインドップラ法による高度化

前述の時間領域相関法とは独立した信号処理法による流量計測の高度化を図ることを目的に、パルストレインドップラ法を開発した。通常のドップラ法は、単パルスの繰り返し送受信により得られた検波信号により流速分布を求めることになるが、パルストレインドップラ法は、トレイン化した複数のパルスを用いることを特徴としている。図8にパルストレインドップラ法の信号処理アルゴリズムを示す。通常のドップラ法と異なり包絡線を求める工程が含まれ、これにより、送信する超音波周波数の数倍程度の測定レンジ拡大が可能となる。なお、パルストレインドップラ法はその信号処理の方法から、従来のドップラ法と同等のリアルタイム測定が可能であることも大きな特徴となる。

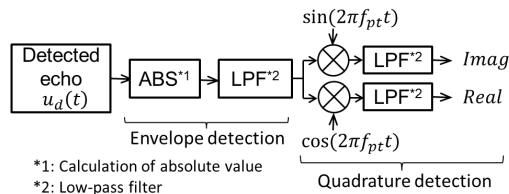


図8 パルストレインドップラ法の原理

パルストレインドップラ法についても、時間領域相関法と同様に図4に示す試験設備にて評価試験を行った。用いた超音波センサの周波数は4MHzであり、パルストレイン数を2とし、レンジ拡大率を4に設定した。これは、通常のドップラ法では1MHzセンサを用いた時の測定レンジと同等とみなせる。本設定により取得した平均流速分布を図9に示す。図中には4MHzセンサを用いた際の流速レンジを同時に示しているが、その3倍程度の流速に対しても十分に測定できていることがわかる。

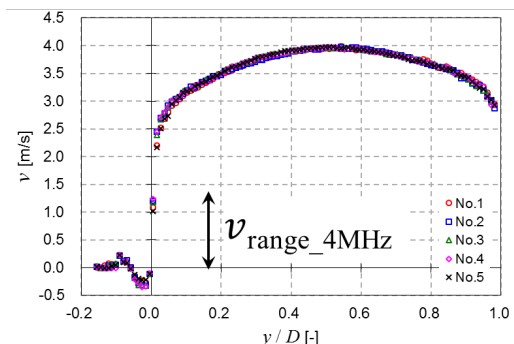


図9 平均流速分布 (400m<sup>3</sup>/h)

また、図9で示した平均流速分布を周積分することで求められた流量の評価を行った結果を図10に示す。流量は200~400m<sup>3</sup>/hの範囲で試験評価を行っており、いずれの流量条件においても高精度で流量計測が可能であることが確認できる。

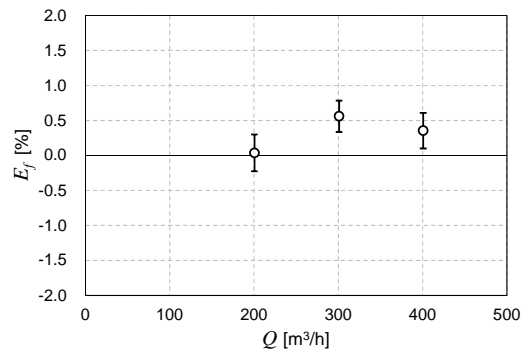


図10 パルストレインドップラ法によって測定された流量の評価

## (3) デコンボリューション法の検討

近接する2本の測線を伝搬する超音波パルスの遅れ時間差から、配管断面上の局所流速情報を得る手法が提唱されている(引用文献(1))。しかしながら、その時間差は極めて微小であり、ノイズの影響も多大に受けることから、そもそも遅れ時間差を測定すること自体が極めて困難である。そこで本研究では、安定的かつ高精度な流量場を実現できる産総研の流量校正設備を使用して、遅れ時間差が実測可能であることを示すための実流試験を行った。

試験は主に2種類に分けられる。まず、極めて安定した流量や水温を実現できる口径200Aの配管試験設備による基礎評価を行った。極微小な遅れ時間差を計測するため、この口径では用いることの稀な10MHzセンサの最適設定・製作及び超低ノイズアンプ等の適用した結果、遅れ時間差の計測に成功した。図11は複数の測線条件における遅れ時間差の実測結果を示しており、流量依存性が明確に確認された。

さらに、大口径及び大流量条件下における計測可能性について実証するため、口径600Aの大型配管試験設備による評価試験を行った(図12参照)。本試験でも、この口径では用いることが稀な4MHzセンサの最適設計・製作及び上記で用いたアンプ等の計測機器を適用することで、3,000~9,000 m<sup>3</sup>/hの大流量条件においても遅れ時間差の計測に成功した。図13に複数の測線条件における遅れ時間差の実測結果を示すが、いずれの測線においても流量依存性が明確に確認されることなどから、遅れ時間差が計測されることが確認できる。

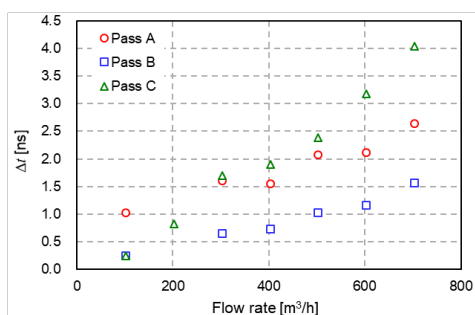


図11 遅れ時間差の実測結果 (200A 配管)

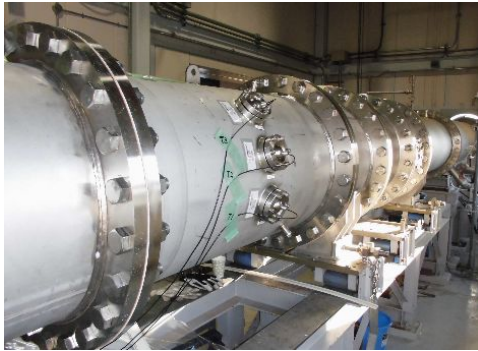


図 1 2 大口径配管における試験例

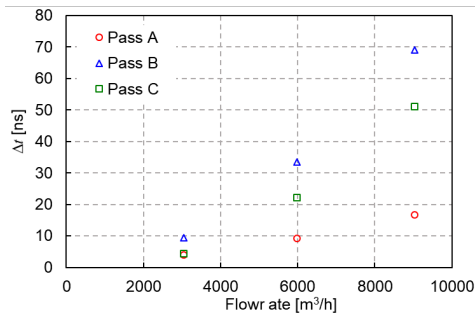


図 1 3 遅れ時間差の実測結果 (600A 配管)

#### <引用文献>

Y. Takeda and K. Takeda, Novel ultrasonic gas flow metering, International Gas Union Research Conference 2008, pp.366-376, Paris, 2008/10

#### 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 3 件)

Ei Muramatsu, Hideki Murakawa, Daiki Hashiguchi, Katsumi Sugimoto, Hitoshi Asano, Sanehiro Wada, Noriyuki Furuichi, Applicability of hybrid ultrasonic flow meter for widerange flowrate under distorted velocity profile conditions, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.94, pp.49-58, 2018,

<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.01.032>, 査読有

Sanehiro Wada, Noriyuki Furuichi and Takashi Shimada, Development of Ultrasonic Pulse-Train Doppler method for velocity profile and flowrate measurement, MEASUREMENT SCIENCE & TECHNOLOGY, 27-115302, 2016, doi:10.1088/0957-0233/27/11/115302, 査読有

Sanehiro Wada, Noriyuki Furuichi and Takashi Shimada, Application of partial inversion pulse to ultrasonic

time-domain correlation method to measure the flow rate in a pipe, MEASUREMENT SCIENCE and TECHNOLOGY, 28-115302, 2017, <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa83df>, 査読有

[学会発表](計 4 件)

Sanehiro Wada, Takakshi Shimada and Noriyuki Furuichi, Influence of the false detection on flowrate measurement using ultrasonic time-domain correlation method, The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Okinawa, 2017/10

和田 守弘, 古市 紀之, 嶋田 隆司, 超音波時間領域相関法におけるパルス形状が流速分布計測に与える影響, 動力・エネルギー技術シンポジウム, 豊橋, 2017/06

Sanehiro Wada, Takakshi Shimada, Application of Partial Inversion Pulse on velocity profile and flowrate measurement using Ultrasonic Time-Domain Correlation method, 10th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, Tokyo, 2016/09  
和田 守弘, 嶋田 隆司, 半逆位相パルスを用いた超音波時間領域相関法による流速分布計測高度化に関する研究, 第 21 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 横浜, 2016/06

[産業財産権]

出願状況(計 2 件)

名称: 流速分布の計測方法及びその装置

発明者: 和田守弘

権利者: 産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: 特願 2016-107822

出願年月日: 2016 年 5 月 30 日

国内外の別: 国内

名称: 流速分布の計測方法及びその装置

発明者: 和田守弘

権利者: 産業技術総合研究所

種類: 特許

番号: 特願 2016-108745

出願年月日: 2016 年 5 月 31 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<https://unit.aist.go.jp/riem/lf-std/LFSmain.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

和田 守弘 (WADA, Sanehiro)  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・工  
学計測標準研究部門・主任研究員  
研究者番号：60738293

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

嶋田 隆司 (SHIMADA, Takashi)  
古市 紀之 (FURUICHI, Noriyuki)  
武田 靖 (TAKEDA, Yasushi)  
村川 英樹 (MURAKAWA, Hideki)