

## クランプオン方式による蒸気流量計測

佐々木 宏<sup>\*1</sup>, 林 智仁<sup>\*1</sup>, 梅沢 修一<sup>\*2</sup>, 杉田 勝彦<sup>\*3</sup>

## Steam flow measurement in the use of clamp-on method

Hiroshi SASAKI <sup>\*1</sup>, Tomohito HAYASHI <sup>\*1</sup>, Shuichi UMEZAWA <sup>\*2</sup> and Katsuhiko SUGITA <sup>\*3</sup><sup>\*1</sup> Azbil Corporation

1-12-2 Kawana, Fujisawa-shi, Kanagawa 251-8522, Japan

<sup>\*2,\*3</sup> Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.

4-1 Egasaki-cho, Tsurumi-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 230-8510, Japan

## Abstract

A clamp-on ultrasonic gas flowmeter we had developed has been modified to measure steam flow by newly developed damping material endurable to high temperature. As clamp-on flowmeters are widely used for temporarily flow measurement because there is no need for plumbing, most of them are for liquid flow measurement because ultrasonic energy wouldn't get into the fluid as acoustic impedance of the pipe and that of the fluid is widely spread. To measure the gas flow by clamp-on flowmeter, damping material is the key of the measurement because it will dampen the propagating ultrasonic wave in the pipe wall and as a result the weak signal go through the fluid can be observed. If the fluid is steam, endurance for high temperature is also required. With the developed flowmeter, the flow of steam at 0.8MPa in the pipe of 50A SGP can be measured up to 30m/s flow rate. This measurement is reproducible. The flowmeter is compatible to both saturated steam and superheated steam. There is no need to alternate the setup when the type of steam change. The key of this success depends on the newly developed damping material. The base material effectively dampen the ultrasonic wave was explored widely from many types of silicone materials. Dense material was added to increase the acoustic impedance of the damping material. We are now trying to lower the measurable steam pressure and widen the types of target pipes. In the process of this trial, we've already found a damping material with which the received ultrasonic signal captured from the clamp-on transducer on the 25A steam pipe could be observed clearly above the noise level. The pressure of the steam was still 0.9MPa but we're trying to lower the measurable pressure limit.

**Key words** : Clamp-on, Ultrasonic, Flow, Flowmeter, Steam, Pipe

## 1. 緒 言

クランプオン式の超音波流量計は配管の工事なしに流量計測を行うようにできるため、一時的な流量計測を行う際などに広く利用されている。しかしながら、測定対象流体が気体であり、かつ配管が金属である場合、気体と金属の音響インピーダンスの違いによりほとんどの超音波エネルギーは気体と金属の境界面で反射してしまい内部の流体に達しないため計測を行うことが困難となる。筆者等はこれを解決するために、信号処理に加えて超音波トランスデューサとダンピング材に工夫を凝らし、クランプオン式の超音波気体流量計を開発した(佐々木, 林, 2015)。この流量計は常温の空気などを対象としたものであり、ダンピング材も常温でのみ使用できるものであった。クランプオン式の超音波流量計を蒸気に対して適用するためには各部の高温対応、特にダンピング材の高温対応が必須となる。従来は高温に耐えるダンピング材として粘土が用いられていたが、高温では乾燥して硬化してしまうなど長期運用に対し懸念があった(Belock, 2005)(鳥取, 2006)。また、従来は100A以上の大口徑配管に対してのみ適用されてきた。筆者等は新たな耐熱ダンピング材を開発し、蒸気流量計測の可能性を見出し

No.16-00397 [DOI: 10.1299/transjsme.16-00397]

<sup>\*1</sup> アズビル (株) (〒251-8522 神奈川県藤沢市川名 1-12-2)<sup>\*2</sup> 正員, フェロー, 東京電力ホールディングス (株) (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)<sup>\*3</sup> 東京電力ホールディングス (株)

E-mail of corresponding author: h.sasaki.ak@azbil.com

た (佐々木他, 2016). 今回, ダンピング材にさらなる改良を加え, 小口径配管での計測の可能性を確認した.

なお, クランプオン方式の蒸気流量計測にはタフト法を用いたものも存在するが (塚田他, 2016), 本稿で提案する手法は従来から超音波流量計に広く用いられてきた伝播時間差法であり, 精度の高い計測が可能である.

## 2. 記号・単位

$S$	Cross-sectional Area [ $\text{m}^3$ ]
$V$	Average Flow Velocity on Ultrasonic Beam [ $\text{m/s}$ ]
$\theta$	Angle between Pipe Axis and Ultrasonic Beam [ $\text{rad}$ ]
$\theta'$	Complementary Angle of $\theta$ [ $\text{rad}$ ]
$L$	Propagation Length [ $\text{m}$ ]
$C$	Sound Speed [ $\text{m/s}$ ]
$t_1$	Forward Propagation Time [ $\text{s}$ ]
$t_2$	Backward Propagation Time [ $\text{s}$ ]
$V'$	Cross-Section Average Flow Velocity [ $\text{m/s}$ ]
$k$	Flow Compensation Factor []
$Q$	Volume Flow Rate [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$\theta_1$	Angle of Incidence [ $\text{rad}$ ]
$\theta_2$	Angle of Refraction [ $\text{rad}$ ]
$C_1$	Sound Speed in Medeuem 1 [ $\text{m/s}$ ]
$C_2$	Sound Speed in Medeuem 2 [ $\text{m/s}$ ]
$k_1$	Wavenumber in Medeuem 1 [ $\text{rad/m}$ ]
$k_2$	Wavenumber in Medeuem 2 [ $\text{rad/m}$ ]
$\omega$	Angular Frequency [ $\text{rad/s}$ ]
$X$	Ultrasonic Wave Physical Value, such as Particle Velocity, Sound Pressure and so on
$x$	Median Filter Input Array
$y$	Median Filter Output Array
$i$	Array Index
$x[a:b]$	Subarray of $x$ with the index between $a$ and $b$
<i>median</i>	Median Value of Input Array
$n$	Range of Applying Median Filter ( $2n+1$ : Order)

## 3. 方 法

### 3・1 超音波流量計

本稿で扱う超音波気体流量計は, 上流から下流 (順方向) および下流から上流 (逆方向) へと伝播する超音波の伝播時間の差から流体の流速・流量を算出する流量計である. この方法は伝播時間差法と呼ばれている. 伝播時間差法による流量計測原理を図 1 に示す.

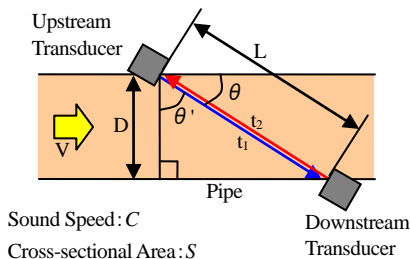


Fig. 1 Principle of Ultrasonic Flowmeter.  
(Propagation Time Difference Method)

断面積 $S$ の配管中を流体が速度 $V$ で流れているとする。  $\theta$ は配管の軸と超音波ビームの軸とのなす角である。

上流側超音波素子から発せられて下流側超音波素子で受けられた超音波の伝播時間（順方向伝播時間）は以下のように表される。

$$t_1 = \frac{L}{C + V \cos \theta} \tag{1}$$

ここで、

$L$  超音波伝播距離[m]

$C$  流体中の音速[m/s]

とする。

超音波は流体の流れに乗って伝播するため、流れが速いほど短い時間で伝播する。

同様に、下流側超音波素子から発せられて上流側超音波素子で受けられた超音波の伝播時間（逆方向伝播時間）は以下のように表される。

$$t_2 = \frac{L}{C - V \cos \theta} \tag{2}$$

超音波は流体の流れに逆らって伝播するため、流れが速いほど長い時間をかけて伝播する。

式 (1) (2) から伝播時間差 $\Delta t$ と流速 $V$ の関係は以下ようになる。

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2LV \cos \theta}{C^2 - V^2 \cos^2 \theta}$$

$C \gg V$ であることから、

$$V \cong \frac{C^2}{2L \cos \theta} \Delta t \tag{3}$$

と変形できる。

配管の内径を $D$ 、 $\theta$ の余角を $\theta'$ とすると式 (3) を以下のように書くこともできる。

$$V \cong \frac{C^2}{2D \tan \theta'} \Delta t \tag{4}$$

この流速 $V$ は図1に示されるような超音波ビームが流体を通過する部分の平均流速（線平均流速）である。流量を求めるためには配管断面における平均流速（断面平均流速） $V'$ を求める必要がある。 $V$ と $V'$ の間には以下の関係がある。

$$V' = \frac{V}{k} \tag{5}$$

ただし、 $k$ は流量補正係数でレイノルズ数と配管表面粗度の関数である。  
断面平均流速  $V'$ に断面積  $S$  をかけると流量  $Q$  を求めることができる。

$$Q = SV' \tag{6}$$

### 3・2 クランプオン式超音波気体流量計

クランプオン式超音波流量計（以下、クランプオン流量計）は、超音波素子が配管の外側から配管に押しえつけられて取り付けられているところに特徴がある。超音波素子（Piezo Element）はウェッジ（Wedge）と呼ばれる楔形の樹脂材料と組み合わせて斜角入射超音波トランスデューサを形成し、配管表面法線方向に対して斜めに超音波を入射させる（図2）。

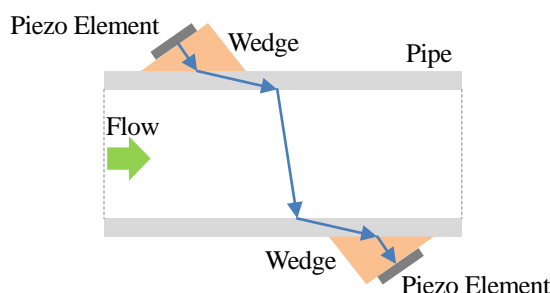


Fig. 2 Clamp-on Ultrasonic Flowmeter.

クランプオン流量計のうち、対象流体が低圧の気体の場合は、配管管壁と流体との界面でほとんどすべての超音波エネルギーが反射されてしまい、流体に達する超音波はごくわずかである。一方で配管管壁内を周方向に超音波が伝播し受信側のトランスデューサに超音波が届いてしまう（図3a）。管壁を伝わる超音波（配管ノイズ）は大きく、流体を伝わって受信側トランスデューサに届いた超音波信号は配管ノイズにかき消されてしまう。

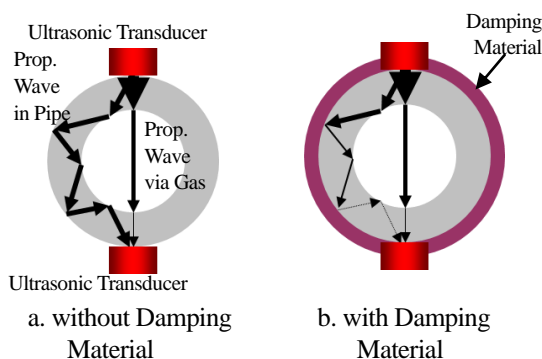


Fig. 3 Effect of Damping Material.

配管の外側にダンピング材を巻くと配管ノイズが吸収され流体を伝わった超音波が観測できるようになる（図3b）。図2ではウェッジから金属配管へ超音波が屈折して透過しているが、我々が気体流量計で開発したトランスデューサではウェッジから金属配管への入射角が臨界角（51°）を超えた57°としていることが特徴である。臨界角を超えているので、超音波は金属配管管壁内をエバネッセント場として伝わっていると推測している（佐々木、林、2015）。超音波におけるエバネッセント場は以下のように説明できる。入射角が臨界角以下である場合に境界面（xy平面）に入射する波動を図4に示す。

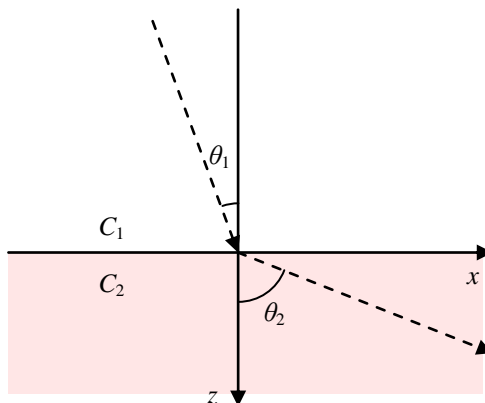


Fig. 4 Refraction.  
 Ultrasonic wave refracts at the interface between two media of different ultrasonic speed.

屈折波の音圧，粒子速度などの物理量は以下のような形で表される．

$$X = Ae^{-ik_2(x\sin\theta_2+z\cos\theta_2)} \tag{7}$$

ただし，時間因子  $e^{i\omega t}$  は省略する．

スネルの法則は以下のように表される．

$$\frac{\sin\theta_1}{C_1} = \frac{\sin\theta_2}{C_2}$$

$\theta_1$  が臨界角を超えると

$$\sin\theta_2 > 1$$

となるが，形式的には

$$\sin\theta_2 = \frac{C_2}{C_1} \sin\theta_1$$

と表すことができる．また，

$$\sin^2\theta_2 + \cos^2\theta_2 = 1$$

であるので，形式的に

$$\cos\theta_2 = \pm i \sqrt{\left(\frac{C_2}{C_1}\right)^2 \sin^2\theta_1 - 1}$$

とおき，これらを式 (7) に代入すると

$$X = Ae^{-ik_2\left(x\frac{C_2}{C_1}\sin\theta_1 \pm iz\sqrt{\left(\frac{C_2}{C_1}\right)^2 \sin^2\theta_1 - 1}\right)} = Ae^{-ik_2x\frac{C_2}{C_1}\sin\theta_1} e^{\pm k_2z\sqrt{\left(\frac{C_2}{C_1}\right)^2 \sin^2\theta_1 - 1}}$$

となる． $z \rightarrow \infty$  で  $X \rightarrow 0$  となるべきなので，復号はマイナスの方のみ有効である．しかるに，

$$X = Ae^{-ik_2x\frac{C_2}{C_1}\sin\theta_1} e^{-k_2z\sqrt{\left(\frac{C_2}{C_1}\right)^2 \sin^2\theta_1 - 1}} = Ae^{-ik_1x\sin\theta_1} e^{-k_2z\sqrt{\left(\frac{C_2}{C_1}\right)^2 \sin^2\theta_1 - 1}}$$

が得られる．この式で1つ目の指数関数が  $x$  方向への伝播を，2つ目の指数関数が  $z$  方向への浸み出し（エバネッセント場）を表す．

エバネッセント場は配管外側表面での粒子速度などが配管内側表面まで浸み出すだけで，配管に波動として伝わるわけではないため，金属配管管壁内での無用な超音波伝播の発生が少なく，配管ノイズが低減する．また，配管管壁内での多重反射が起こらないため，臨界角以下の場合（図5b）に比べて受信信号の時間的な広がりが小さくなることが実験により観測されている（図5c）．

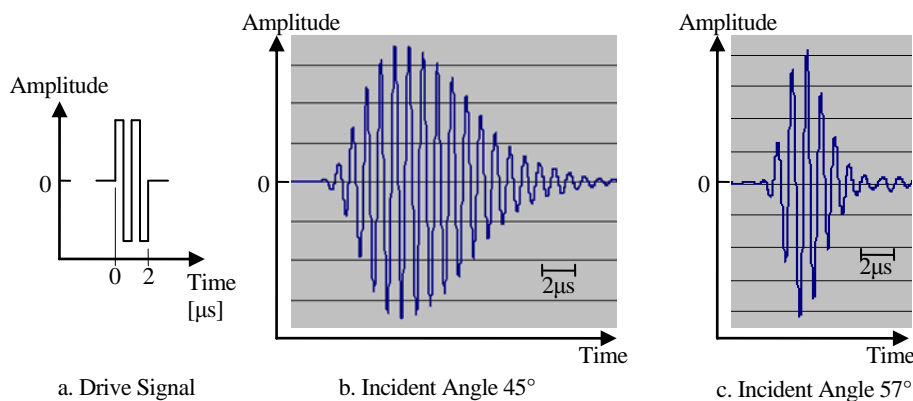


Fig. 5 Comparison of Ultrasonic Signal at Different Incident Angles.  
Received signal width becomes narrower with the higher incident angle.  
Drive Signal Conditions: 1MHz, Square Wave, 2 Cycle

伝播時間差は順方向と逆方向の超音波受信信号波形に対して相互相関を演算することにより得られる相関ピークの位置から求めることができる．相互相関を用いる場合には様々な信号処理方法を使うことができるため安定した計測を行うことができる（佐々木，林，2015）．超音波受信信号波形は狭い時間領域で切り出してみると正弦関数に近く，この結果として相互相関も受信信号と同じ周期を持つ正弦関数に近くなる．図5bのような波形の場合には，受信信号中のノイズによっては誤った相関ピークを伝播時間に相当する相関ピークとして誤認し誤った伝播時間差を算出してしまふことがある．ノイズが小さい場合には本来の相関ピークの隣のピークと誤認するだけであるが，ノイズが大きくなると複数周期離れたピークを相関ピークとして誤認することもある．図5cのような波形を使うと相互相関の伝播時間に相当する相関ピーク以外のピークが小さく抑えられ，ピークを誤認することなく安定した計測が可能となる．

### 3・3 蒸気流量計

クランプオン流量計による蒸気流量の計測は従来から困難と考えられており，計測例は極めて限られている（鳥取，2006）．蒸気流量計測では使用する部材の耐熱化が必要となる．実験サイトでの蒸気圧力を参考にして，耐熱化の目標を0.8 MPaの飽和蒸気相当（170℃）とした．

#### 3・3・1 トランスデューサの耐熱化

蒸気配管に気体流量計用のトランスデューサを設置し各部の温度を計測したところ，各部材がその計測された温度に耐えられることが分かったため（表1），今回はトランスデューサについての耐熱化を行わないこととした．

Table 1 Temperature at Each Part of Transducer.  
Conditions  
Steam: 0.95 MPa(177 °C)  
Pipe: 50A(2inch) t3.8 mm Carbon Steel

Part	Measured Temp.[°C]	Maximum Durable Temp. [°C]
Wedge	154	170
Piezo Element	88.7	140

### 3・3・2 ダンピング材の耐熱化

高温に耐える吸音材料ということでシリコンゴムとフッ素ゴムとに着目した。ただし、フッ素ゴムは比較的硬いもの (>60 ポイント (タイプ A)) が多く、配管への密着性に乏しくダンピング性能を上げることができなかった。このため、シリコンゴムの中から柔らかくてかつダンピング性能の高いものを探索することとした。

### 3・3・3 ダンピング性能の評価

ダンピング材を蒸気配管に取り付けて超音波の減衰性能を評価すると、蒸気配管への取付の良否により性能が上下することが分かっている。このため、金属板を伝播する超音波をどの程度減衰できるか評価するダンピング性能評価装置を製作した (図 6)。

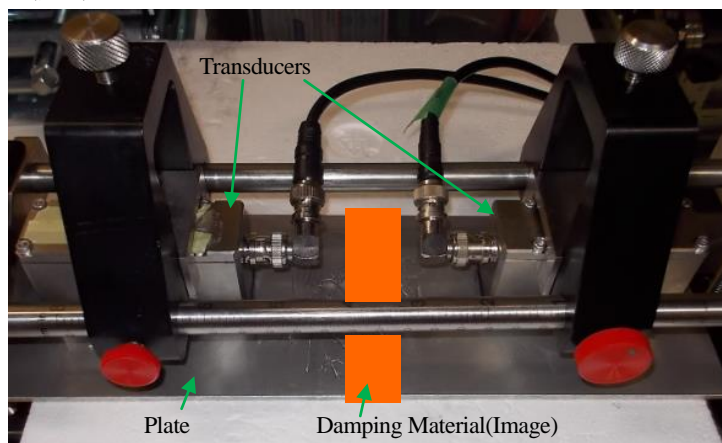


Fig. 6 Damping Material Evaluator.

The plate is a substitution of the pipe wall.

With this evaluator, damping ability can be evaluated with the stable conditions.

この評価装置では配管の代わりに金属板 (Plate) を使用する。金属板にそれぞれ送信用、受信用とした 2 つのトランスデューサを押し当て、金属板の間に超音波を伝播させる。トランスデューサの間に評価対象のダンピング材を置き、超音波の減衰量を測定する。配管に比べてダンピング材の設置が容易であるため、安定して計測を行うことができる。

この装置を使ってまずは各種シリコン材料 (表 2) のスクリーニングを行った。図 7 にその結果の一部を示す。この実験からシリコン材料として A を選択した。シリコン材料としては、配管への密着度合いを高めるために硬度が低く、またシリコン内部で超音波を減衰させるために損失減衰率が高いものが望ましいと考えられたが、これらの指標と減衰率との相関は見いだせなかった。

シリコン材料 A に対し、密度の高い粉末を混ぜて音響インピーダンスを高め、より多くの超音波エネルギーが配管からダンピング材へ透過し超音波エネルギーが吸収されるようにした。シリコン材料 A に混ぜる混練材 (表 3) によるダンピング測定の結果 (混練材無しに対する減衰率の増分) を図 8 に示す。この実験から、混練材として  $\alpha$  を選択した。

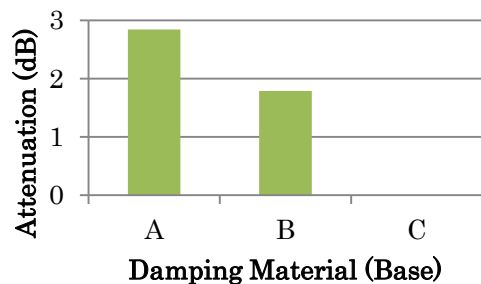


Fig. 7 Damping Material (Base) Attenuation.

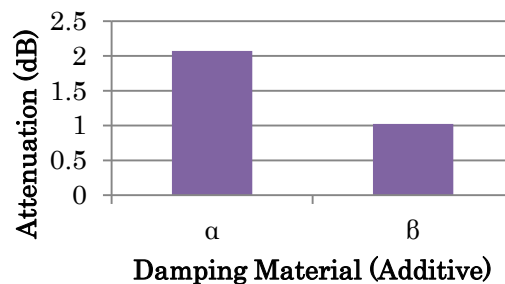


Fig. 8 Damping Material (Additive) Attenuation.

Table 2 Damping Material (Base).  
all Items are silicone rubber.

Item	thickness [mm]	hardness (type-A)	loss modulus [MPa]
A	1	34	0.99
B	1	5	-
C	1	63	3.3

Table 3 Damping Material (Additive).

Item	Description
α	Tungsten powder
β	Balium sulfate powder

以上の測定により、ダンピング材の基材と混練材とを選択した。

### 3・4 計測条件

下記の条件（表4）で蒸気流量の計測を行った。

Table 4 Measurement Conditions.

Item	Value
Pipe	50A SGP {OD 60.5, t3.8, Carbon Steel}
Steam	0.8 MPa Saturated : 170 °C Superheated: 175 °C
Flow Velocity	5~30 m/s Targeting Flow: 5, 10, 20, 30 m/s
Straight Length	Upstream: 27D Downstream: 12D
Boiler	0.9 MPa, water tube
Reference	Vortex Flowmeter VXW1050-N11G-1104A (Oval) Range:490 m <sup>3</sup> /h(max) Accuracy: ±1%

### 3・5 設置

図9に示す配置構成で流量計測系を設置した。



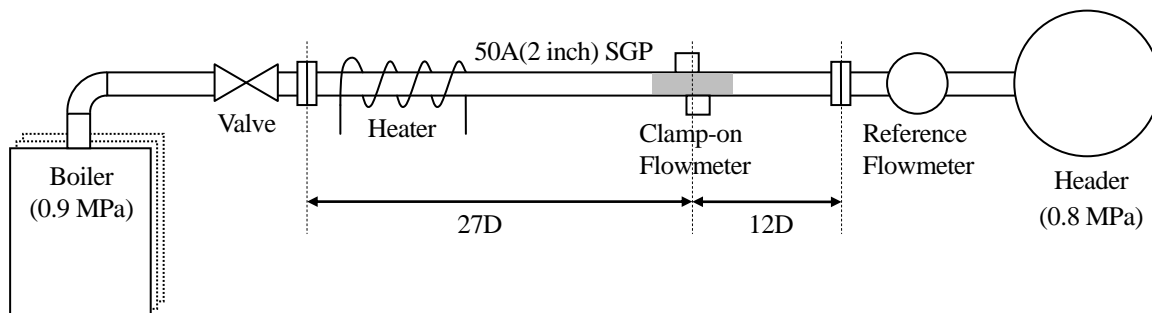


Fig. 9 Measurement Setup (Simplified).

直管部分の蒸気配管の断熱材を剥ぎ、クランプオン流量計を取り付けた。さらに湿り対策として測定点のすぐ上流側の配管にヒータを設置し、蒸気の温度を飽和蒸気に対して 5 °C 程度上昇させることで過熱蒸気も発生させ、飽和蒸気の場合との流量計測の比較を行った。

計測点のすぐ下流には渦流量計を設置し、この流量計（以下、リファレンス流量計）の計測値をリファレンスとしてクランプオン流量計の計測値と比較した。渦流量計もクランプオン流量計も基本原理は流速計測であるので、断面平均流速で比較することとした。すなわち、渦流量計については密度一定の仮定で質量流量として変換器から出力される流量計測値を密度で割り体積流量を求め、さらに 50A SGP 配管の内断面積で割って断面平均流速を求めた。また、クランプオン流量計については式 (1) ~ (5) により計算される断面平均流速を用いた。

リファレンス流量計の下流に蒸気ヘッダがあり、ヘッダ内の圧力が 0.8 MPa となるようにシステムが制御されている。これにより、クランプオン流量計およびリファレンス流量計位置での蒸気は流量によらずほぼ 0.8 MPa となっている。圧力の変動により蒸気の密度が変化するため体積流量と質量流量との関係は変わるが、本計測では両者を流速で比較しているため、圧力の変動は許容される。

蒸気流量はボイラーと計測点との間にあるバルブは手動で開度を調整することにより設定する。このため、精度の高い流量調整は困難で、流量は目標設定値である 5, 10, 20, 30 m/s に近い値であればよいものとした。実際に流れる蒸気流量はリファレンス流量計により計測され、クランプオン流量計の計測値と比較される。

#### 4. 結 果

観測された受信信号波形の例を図 10 に示す。

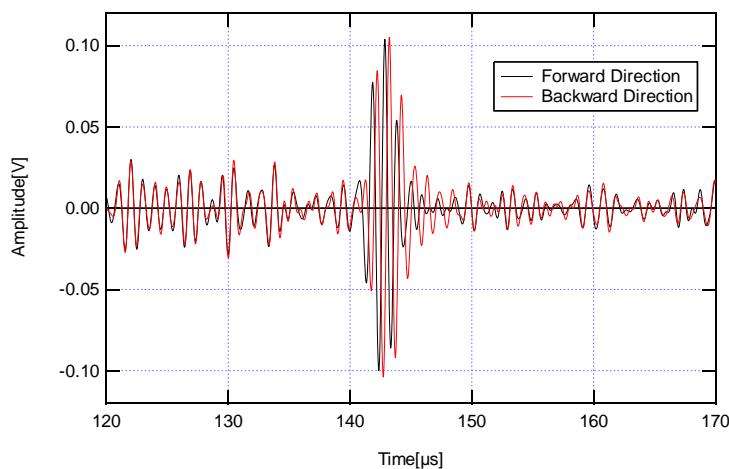


Fig. 10 Received Ultrasonic Signal.

( $V = 5.9$  m/s, Saturated Steam, 0.8 MPa, pipe: 50A(2-inch), t3.8, carbon steel)

Ultrasonic wave traverses once in the pipe. Ultrasonic signal of the opposite direction through the flowing steam makes propagation time difference.

黒の線は順方向の信号を、赤の線は逆方向の信号を示す。横軸は駆動信号印加からの時間を表す。140  $\mu\text{s}$  を少し超えたあたりで赤と黒の線に差が生じているのは、順方向と逆方向の超音波伝播で伝播時間に差が生じていることによる。すなわち、この部分が蒸気中を伝わった超音波信号に相当する。それ以外の部分では赤と黒の線が重なっている。これらの部分は配管管壁内を伝播した超音波信号に相当する。赤と黒の線が分かれている部分の伝播時間差を相互相関計算から求めることで式 (4) を使って線平均流速を、さらに式 (5) を使って断面平均流速を求めることができる。

バルブをある位置で固定し蒸気を流し続けた時のクランプオン流量計とリファレンス流量計の計測値を図 11 に示す。

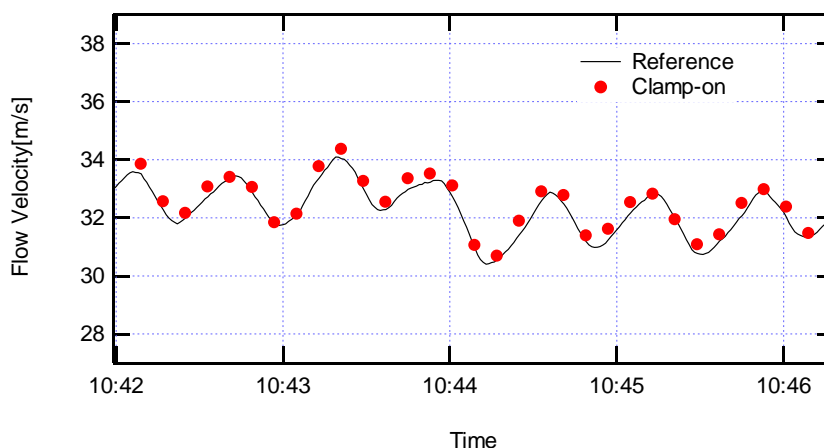


Fig. 11 Flow Velocity.

( $V=30$  m/s, Superheated Steam)

Flow velocity of the Reference flowmeter and Clamp-on flowmeter changes in the same manner. The fluctuation of the flow velocity is caused by the boiler controller.

流量としては、クランプオン流量計については式 (4) と式 (5)、リファレンス流量計については式 (6) からそれぞれ算出される断面平均流速を用いた。リファレンス流量計は計測後の検定が行えないなど校正が十分でなく絶対的な誤差の評価を行える環境にはなかったが、計測の再現性や各流量での誤差のばらつきを評価するには十分である。再現性がありばらつきが小さければ、後は適切な値付けさえ行えば精度の高い計測が行えることとなる。そこで、流量補正係数  $k$  としては、リファレンス流量計の誤差を含めて複数の流量についてフィッティングされた結果である 0.945 を用いた。

ボイラーの自動制御により流量が変動しているが、この変動の様子がリファレンス流量計とクランプオン流量計とでほぼ一致しており、クランプオン流量計が流量変動に追従して計測できていることを確認できる。

## 5. 考 察

### 5・1 流量精度検証

前述のようにボイラーの値は変動しているため、リファレンス流量計とクランプオン流量計の計測結果は同じ計測期間で平均し比較した。

リファレンス流量を横軸、クランプオン流量を縦軸にとったグラフを図 12 に示す。

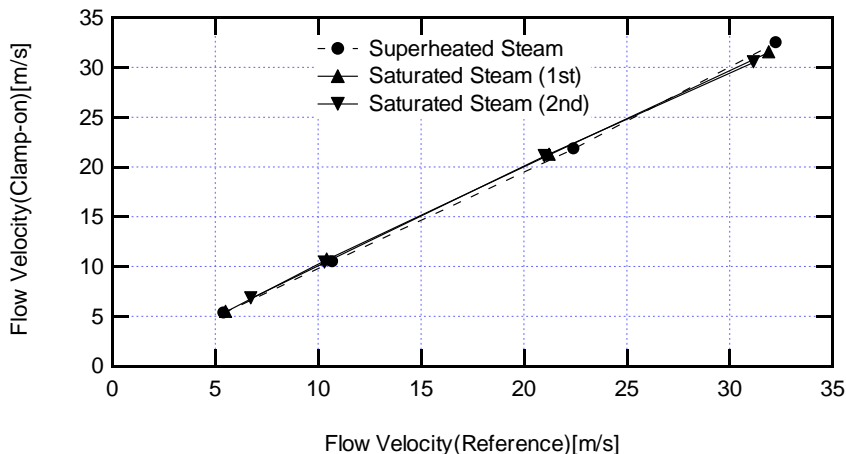


Fig. 12 Flow Velocity.  
Flow velocity of the Reference flowmeter and Clamp-on flowmeter

各々のグラフの傾きがほぼ1となっている。クランプオン流量をリファレンス流量で割ってクランプオン流量計のリファレンス流量計に対する流量比を表したものを図13に示す。

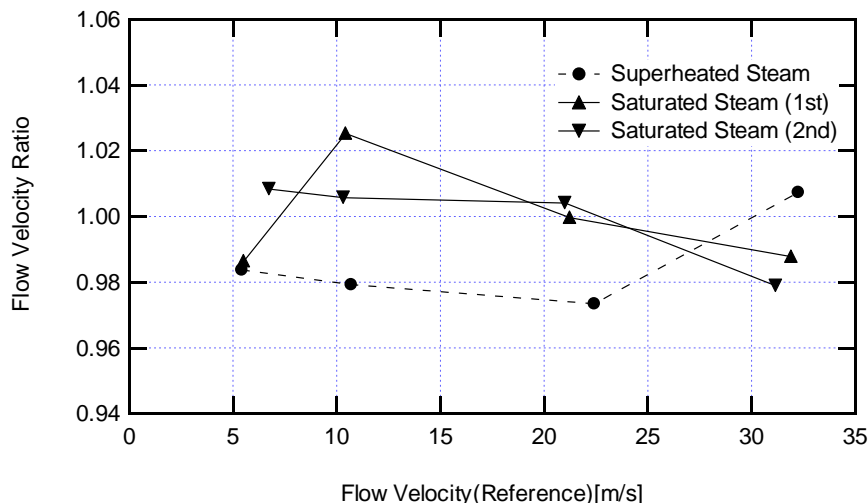


Fig. 13 Flow Velocity Ratio.

飽和蒸気の1回目と2回目の結果はよく一致しており、再現性良く測定ができています。流量比に対して平均値と標準値を計算したものを表5に示す。

Table 5 Result of Flow Ratio.

Steam Condition	Average	Standard Deviation
Superheated	0.986	0.015
Saturated (1st)	1.000	0.018
Saturated (2nd)	0.999	0.014

### 5・2 流量変動への追従

バルブ操作により流量を変動させながら過熱蒸気の流量計測を行った。クランプオン流量とリファレンス流量とをプロットすると図14のようになる。

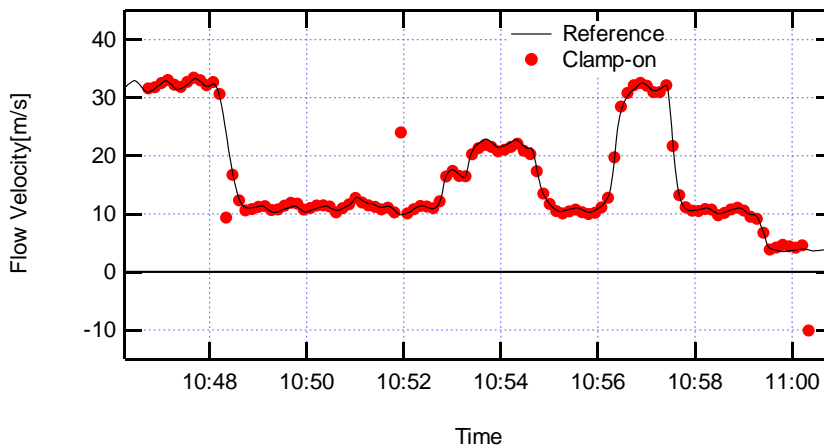


Fig. 14 Flow Velocity Trend (Superheated Steam).  
Three abnormal value points are observed.

3 か所でリファレンス流量計とクランプオン流量計の流量値に著しい差が生じているが（10:48 付近，10:52 付近，11:00 付近）それ以外では両者はよく一致している．同様に飽和蒸気に対しても計測結果をプロットした（図 15）．

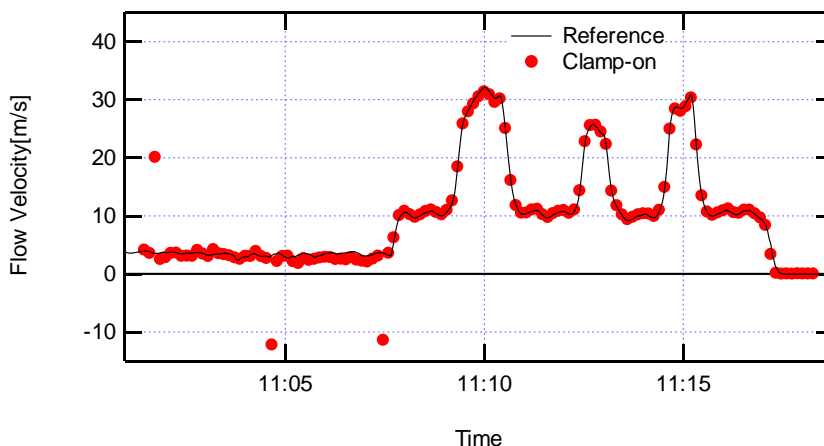


Fig. 15 Flow Velocity Trend (Saturated Steam).  
Three abnormal value points are observed.

こちらも全部で3 か所について誤検出が見つかった（11:01 付近，11:04 付近，11:07 付近），それ以外のところではよく一致している．

図 14，図 15 において観測された誤検出はいずれも散発的であり，例えば以下のようなメディアンフィルタで容易に取り除くことができる．

$$y[i] = \text{median}(x[i - n : i + n]) \tag{8}$$

ここで，

- $x$       フィルタ入力配列
- $y$       フィルタ出力配列
- $i$       要素番号

$x[a:b]$  要素番号  $a$  から  $b$  までの  $x$  の部分配列  
 $median$  引数の配列に対する中央値  
 $2n+1$  次数

である。次数を 3 ( $n=1$ ) とした場合の結果を図 16, 図 17 に示す。

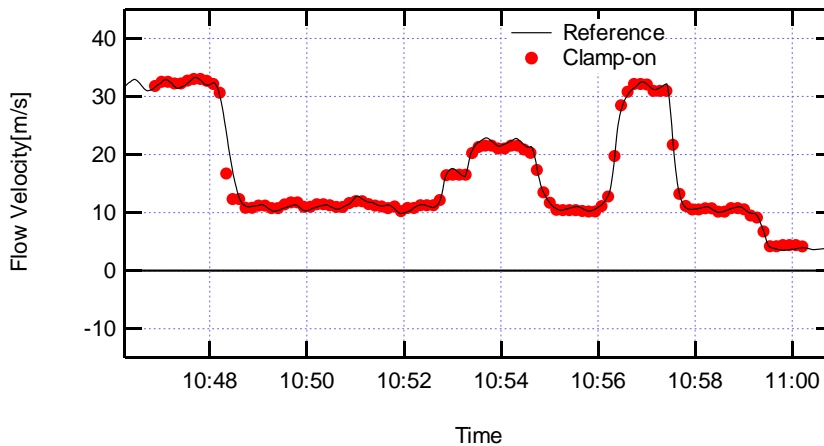


Fig. 16 Flow Velocity Trend (Superheated Steam).  
 Median Filtered (order: 3)  
 Abnormal value points are removed.

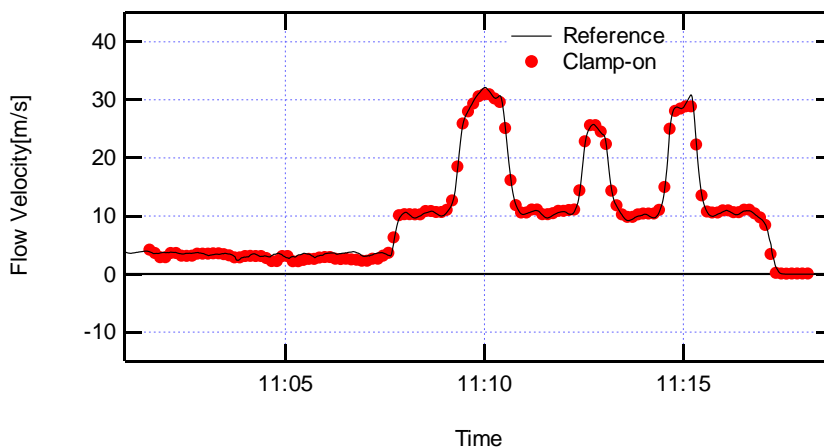


Fig. 17 Flow Velocity Trend (Saturated Steam).  
 Median Filtered (order: 3)  
 Abnormal value points are removed.

細かいピークへの追従が少し悪くなっているものの著しい測定差の生じる点は減少し、信頼性が増している。

### 5・3 小口径配管の検討

より小口径の配管に対する計測ニーズがあることから 25A 配管に対する計測を実施した。25A 配管は管伝播波（ノイズ）の影響が大きく従来計測が大変難しいと考えられてきた。配管が小口径であることから配管に巻くダンピング材の面積に制約がある。ダンピング材として薄手のシリコンシートを使い、クランプオン流量計を 25A 配管に設置したところ(図 18), 0.9 MPa の飽和蒸気に対し順方向と逆方向の受信信号を確認することができた(図 19)。ここで、黒の線は順方向の信号を、赤の線は逆方向の信号を示す。横軸は駆動信号印加からの時間を表す。200  $\mu$ s 付近で黒と赤の線が分離しており、この部分が蒸気を通った超音波信号であることを示している。



Fig. 18 25A(1 inch) Steam Pipe Setup.

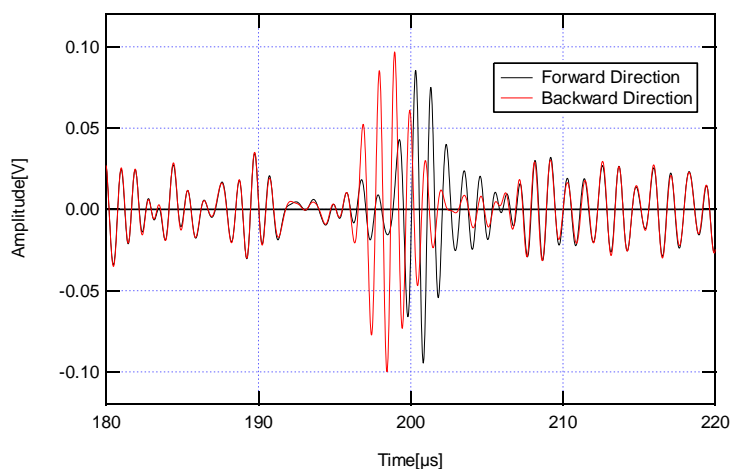


Fig. 19 Received Ultrasonic Signal.

( $V = 17.5 \text{ m/s}$ , Saturated Steam,  $0.9 \text{ MPa}$ , pipe: 25A(1-inch), t3.2, carbon steel)  
 Ultrasonic wave traverses 3 times in the pipe. The signal through the steam (shown around  $200 \mu\text{s}$ ) is larger than the noise through the pipe wall (shown around  $190 \mu\text{s}$ ).

図 19 の計測結果から伝播時間差を計算すると  $1.35 \mu\text{s}$  であった。  $0.9 \text{ MPa}$  での音速 ( $500 \text{ m/s}$ ) や配管内径などを基に式 (4) から流速を計算すると  $11.7 \text{ m/s}$  となる。一方でリファレンス流量計として用いた差圧式流量計の計測結果から流量を計算すると  $17.5 \text{ m/s}$  であった。しかし、クランプオン流量計で SN 比の良い波形がえられていることから、流量計測の可能性があると考えられる。

## 6. 結 言

クランプオン流量計による蒸気の流量計測を行った。誤差や異常値の不具合があるものの、50A 配管での蒸気流量計測を行うことができた。異常値は簡単なフィルタで取り除くことが可能であった。また、25A 配管では蒸気を通った超音波信号をノイズに対し明瞭に判別することができたため、流量計測の可能性があると考える。今回行えなかった高精度な誤差解析については別途計画を進めている。

50A での測定で  $0.8 \text{ MPa}$ 、25A での測定で  $0.9 \text{ MPa}$  といずれも高圧での測定であったが、現場ではより低圧での測定が望まれており、今後対応を進めていく。また、今回測定では SN 比が十分であるとは言えず、より安定した測定のためには SN 比の向上が不可欠である。ダンピング材の種類や設置方法を工夫していくことで SN 比の向上を図っていく。

## 文 献

- Belock, D., Full steam ahead, Processing's 2005 Flowmeter Handbook (2005).  
佐々木宏, 林智仁, クランプオン超音波気体流量計の開発, azbil Technical Review, Vol. 2015 年 4 月(2015), pp.63–69.  
佐々木宏, 林智仁, 梅沢修一, 蒸気配管におけるクランプオン式超音波流量計測, 第 21 回動力・エネルギー技術シンポジウム(2016), 講演番号 D131.  
鳥取澄生, クランプオン蒸気流量計, 計測技術, Vol.34, No.3 (2006), pp.29-30.  
塚田圭祐, 相羽大樹, 川口達也, 木倉宏成, 杉田勝彦, 梅沢修一, 高温金属配管の蒸気流量計測に向けた超音波ビームフォーカシングに関する研究, 第 21 回動力・エネルギー技術シンポジウム(2016), 講演番号 D132.

## References

- Belock, D., Full steam ahead, Processing's 2005 Flowmeter Handbook (2005).  
Sasaki, H. and Hayashi, T., Development of a clamp-on ultrasonic flowmeter for gas, azbil Technical Review, Vol. April 2015(2015), pp.63–69 (in Japanese).  
Sasaki, H., Hayashi, T. and Umezawa, S., Clamp-on ultrasonic flow measurement for steam pipe, The 21st National Symposium on Power and Energy Systems (2016), Paper No. D131 (in Japanese).  
Tottori, S., Clamp-on steam flowmeter, Instrumentation and Automation, Vol.34, No.3 (2006), pp.29–30 (in Japanese).  
Tsukada, K., Aiba, T., Kawaguchi, T., Kikura, H., Sugita, K. and Umezawa, S., Ultrasonic beam focusing for steam flowrate measurement in high temperature metal pipe, The 21st National Symposium on Power and Energy Systems (2016), Paper No. D132 (in Japanese).