

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

アズビル株式会社
技術開発本部

佐々木 宏
Hiroshi Sasaki

アズビル株式会社
技術開発本部

林 智仁
Tomohito Hayashi

キーワード

クランプオン, 超音波, 気体, 流量計, 臨界角, エバネッセント, ダンピング材, ヒルベルト変換, 同期加算

高性能ダンピング材と臨界角を超える入射角を持つトランスデューサとの組み合わせにより、金属配管中の常圧空気の流量計測が可能なクランプオン超音波気体流量計の開発に成功した。この流量計は空気以外の気体にも適用可能で、従来の製品に比べてより低い圧力から流量計測が可能である。臨界角を超えるトランスデューサにおける超音波伝播メカニズムについて考察し、エバネッセントにより伝播されているのではないかと結論した。ノイズに強く精度の高い計算ができる信号処理方法についても解説する。

By combining a high-performance damping material and an ultrasonic transducer with an angle of incidence greater than its critical angle, we have developed a clamp-on ultrasonic gas flowmeter capable even of measuring the flow of air at normal atmospheric pressure inside metal pipes. The flowmeter can also be used with gases other than air, and its minimum measurable pressure is lower than that of existing clamp-on gas flowmeters. Based on analysis of the ultrasonic wave transmission mechanism by the transducer with the critical angle exceeded, it is believed that transmission is by evanescent field. A robust and high-precision signal processing method is also described.

1. はじめに

クランプオン超音波流量計は、配管の外側に超音波トランスデューサを取付けることで配管内部の流体の流速・流量を計測することができる流量計である。配管を切断することなく配管内部の流体の流量を計測することができるため、「液体」用の流量計としては産業分野で広く用いられている。配管の切断が不要なことから、

- ・後付けもしくは一時的な設置
- ・配管内のコンタミネーションが許容されない現場

に適している。また、流量計が直接流体に触れないので、腐食性流体にも対応できる。さらに、配管が大口径の場合、配管を切って挿入する従来の流量計では流量計そのものが大型になるが、クランプオン超音波流量計では配管に取り付ける超音波トランスデューサは、小口径のものとは

ほぼ同じ大きさであり、クランプオン超音波流量計を使用するメリットが大きい。

ただ、技術的難易度の高さから「気体」の流量を計測できるクランプオン超音波流量計は少ない。また、測定条件に制約が多く、低い圧力の気体には対応できていなかった。このため低い圧力から計測できるクランプオン超音波気体流量計が求められている。

2. 測定原理

本稿で扱うクランプオン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。

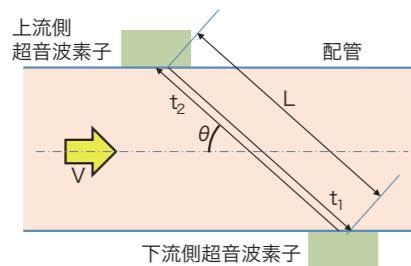


図1 伝播時間差法の原理

断面積Sの配管中を流体が速度Vで流れているとする。θ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 t_1 (順方向伝播時間)は以下のように表される。

$$t_1 = \frac{L}{C + V \cos \theta} \quad (1)$$

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 t_2 (逆方向伝播時間)は以下のように表される。

$$t_2 = \frac{L}{C - V \cos \theta} \quad (2)$$

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。

(1)、(2)から伝播時間差 $\Delta t = t_2 - t_1$ と流速Vの関係は以下ようになる。

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

$C \gg V$ であるので、

$$\Delta t \cong \frac{2LV \cos \theta}{C^2} \quad (3)$$

したがって、

$$V \cong \frac{C^2}{2L \cos \theta} \Delta t \quad (4)$$

この流速Vに断面積Sと流量補正係数kをかけると流量Qを求めることができる。

$$Q = kSV \quad (5)$$

流量補正係数は超音波ビームが流体を通る部分の平均流速と配管断面における平均流速との比を補正するための係数である。

伝播時間差について一例を挙げる。配管として100A Sch10S配管(内径108.3 mm)を用い、音速が343 m/s、

$\theta=84.3^\circ$ であった場合、(3)より流速1 m/sにおける伝播時間差は0.184 μ sとなる。同様に、流速が30 m/sにおける伝播時間差は5.52 μ sとなる。超音波の周波数を1 MHzとした場合その周期は1 μ sであるため、超音波の周期をまたいで広い時間範囲での時間差計測を行うことが必要になる。

3. ダンピング材

クランプオン超音波流量計は、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。超音波素子はウェッジ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)。

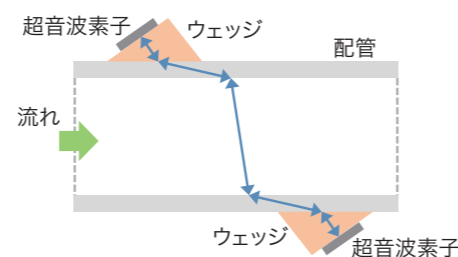


図2 クランプオン超音波流量計

クランプオン超音波流量計の第一の課題は超音波の回り込みである。超音波は、金属である配管から気体へ透過する気中伝播波よりも配管金属中を伝わる管伝播波の方が伝わりやすい。また、管伝播波と気中伝播波とは同じ周波数の信号であるため、受信信号からこれら二つの信号を分離することは困難である。そこで、配管を振動吸収材(ダンピング材)で覆うことにより配管を伝わる超音波エネルギーを吸収し、管伝播波による超音波の伝播を低減することで、気中伝播波を検出しやすくしている(図3)。

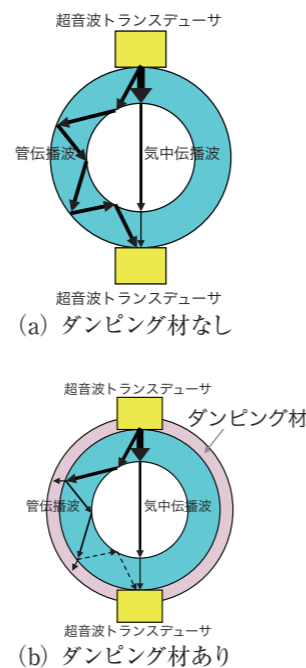


図3 ダンピング材の効果

ただし、ダンピング材を使っても配管を伝わる超音波は完全になくなるわけではない。ゴム母材や添加剤を変えながら評価を繰り返した結果、他社で従来から使われているダンピング材(図4「O」)に比べて8倍のSN比となる高性能なダンピング材(図4「A」)を開発することができた。SN比は気中伝播波と管伝播波の振幅の比で、配管の種類や圧力などの測定条件は同一にしてある。

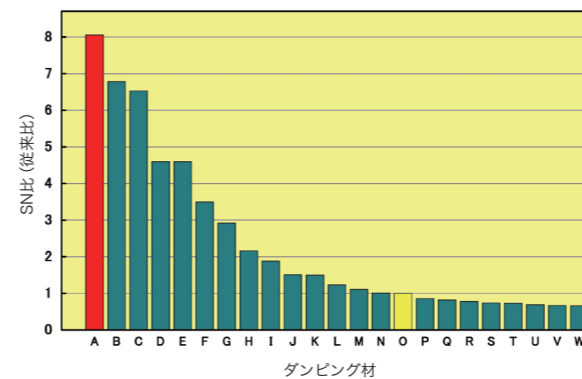


図4 ダンピング材の性能比較

4. トランスデューサ

クランプオン超音波流量計の第2の課題は、超音波の波形が拡がりやすくなることである。図5にクランプオン超音波気体流量計における受信信号波形の例を示す。

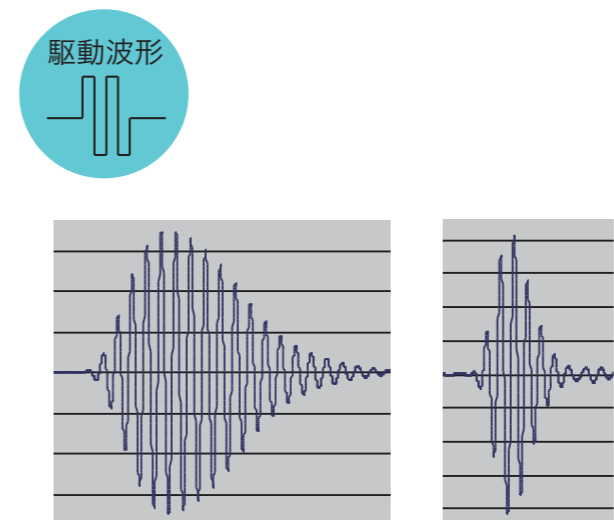


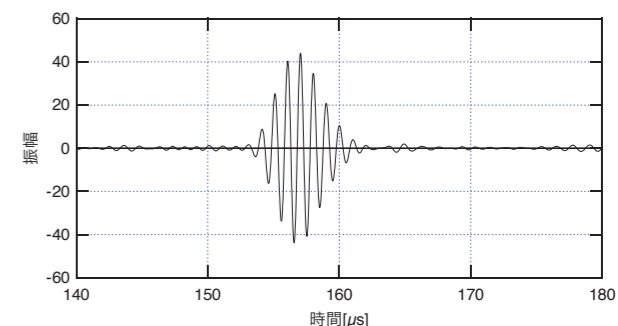
図5 超音波受信信号波形の例

送信信号としては2周期分のパルス波を用いているが、従来のトランスデューサを用いると受信信号は大幅に拡がってしまっていた。これは超音波素子が共振器であることに加えて、配管の管壁内で超音波が多重反射することにより配管から気体中へ超音波が継続的に供給され、受信信号が時間的に長く引き伸ばされてしまっているためと考えられている⁽¹⁾。

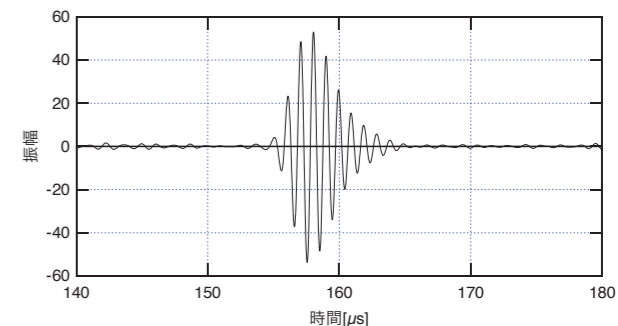
伝播時間差は相互相関により計算する場合が多いが、受信信号が拡がってしまうと複数ある相関ピークの山の高

さが揃ってきて伝播時間差を周期の整数倍分だけ誤って算出する恐れが高くなる。安定した計測を行うためには人間が目で見ても対応点をすぐに判断できる程度に受信信号波形を鋭いものとする必要がある。

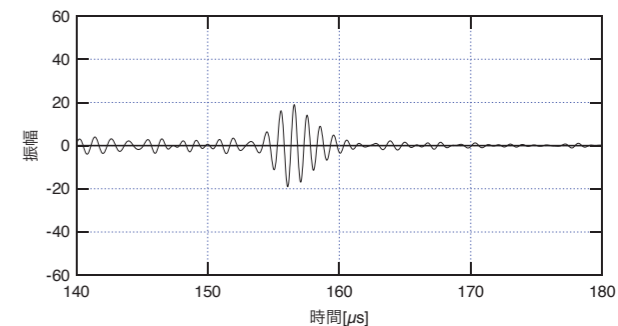
超音波の入射角を変えて試してみたところ、入射角を大きくしていくと受信信号の拡がりを抑えられる傾向が見られた。そこで、ウェッジから配管金属への臨界角(51°)を超える範囲まで入射角を大きくしていったところ、臨界角を超えても超音波を受信することができ、また波形の拡がりも抑えられることが分かった。そこで、3種類の角度54°、57°、60°でウェッジを作り波形を比較したところ、57°付近で受信波形が振幅、拡がりともに最適となることが分かった(図6)。



(a) 入射角54°
振幅80



(b) 入射角57°
振幅100



(c) 入射角60°
振幅40

図6 入射角を変えた場合の受信波形

5. 信号処理

5.1 処理の流れ

受信信号は「同期加算」によりノイズを低減したのち、「ヒルベルト相関」により順方向と逆方向との超音波伝播時間差を算出している(図7)。

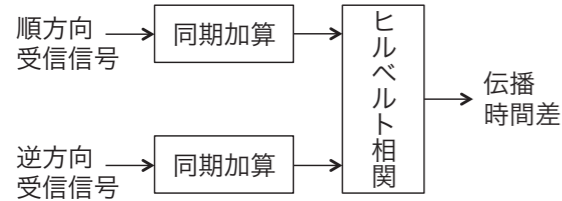


図7 信号処理

5.2 同期加算

3章でのノイズは主に配管を伝わる超音波を指していたが、これとは別に外来性のランダムノイズが存在する。このランダムノイズに対しては、送信信号に対して同じタイミングで受信信号のキャプチャを繰り返し、複数の受信信号を同じ時間ごとに足し合わせることで、ノイズの影響を軽減することができる。この手法は同期加算と呼ばれている⁽²⁾。本稿で使っている波形はこの同期加算を施したデータである。必要な同期加算回数は測定環境でのノイズの大きさにより異なるが、通常は数十回の同期加算によりノイズの少ないきれいな波形を得ることができる。

5.3 ヒルベルト相関

順方向と逆方向の伝播時間差は、それぞれの受信波形の相互相関を計算し、相関ピークの位置から求める。一般に相関ピーク付近の相関値は変化に乏しいため、相関ピーク位置を正確に求めるのは難しい。

順方向と逆方向の受信信号波形は最大値付近のみを切り出してみると余弦関数に近い。これは、送信側と受信側の超音波素子はそれぞれ共振器になっているため、共振周波数の成分を多く持っているためである。このため、相関関数自体も余弦関数に近い形状となっている。

ヒルベルト変換を使うと位相を90°ずらした波形を得ることができる。相関関数に対してこれを適用すると、相関関数ではピーク位置を計測しなければならなかったのが、ヒルベルト変換をかけることでゼロクロス位置の計測を行えばよいこととなる。

さらに、相関関数を余弦関数、ヒルベルト変換をかけたものを正弦関数と見なして、逆正接演算により位相に変換すると、伝播時間差の計算が直線のゼロクロス位置の算出へと変換されることとなり、伝播時間差を精度良く求めることができるようになる。

相関計算のピーク位置検出にヒルベルト変換を使う方法(ヒルベルト相関)は従来から提案されていた⁽³⁾。この提案では相関を計算したのちにヒルベルト変換が行われていたが、筆者らはヒルベルト変換を相関計算の中に組み入れることで、効率よく計算できるようにした(図8)。

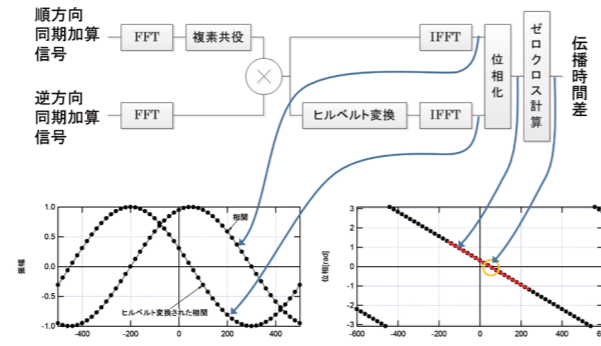


図8 ヒルベルト相関

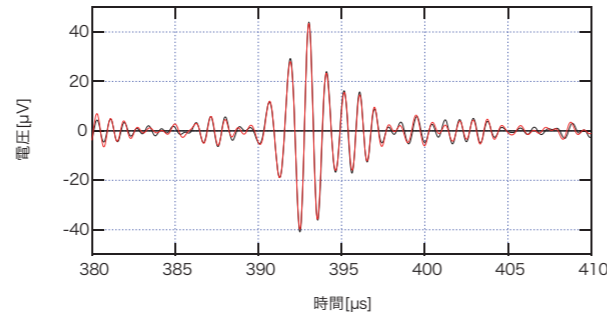
6. 計測

新たに開発したダンピング材とトランスデューサを用いて低い圧力での流量計測を試みた。

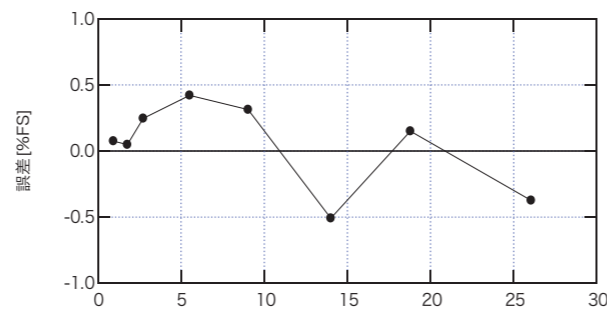
6.1 空気に対する流量計測精度評価

流量0での常圧空気に対するクランプオン超音波気体流量計の受信信号波形を図9(a)に示す。配管としては40A Sch40を用いた。常圧(0MPaG)であるにもかかわらず、配管を伝わるノイズに対して十分な気中伝播波が観測されている。

設備の都合により流量を流すためにはある程度の圧力が必要であったため、0.1 MPaGで流量を計測した。比較対象としては校正済みのタービンメータを用いた。タービンメータの計測値をクランプオン超音波気体流量計測定位置における流速に換算し比較したところ、目標としている±2 %FSで計測を行うことができた(図9(b)) (フルスケール(FS)は30 m/sとしている)。



(a) 超音波受信波形 (0 MPaG)

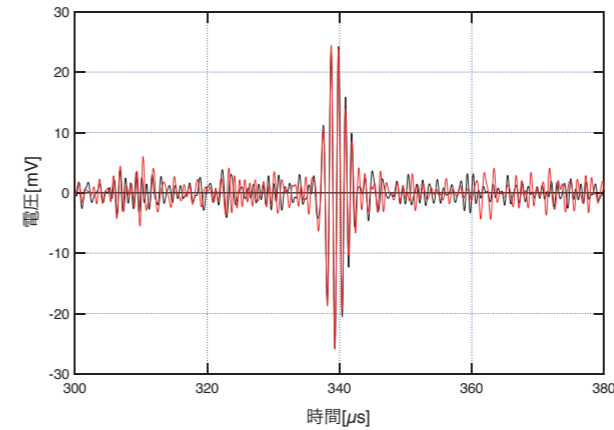


(b) 計測精度 (0.1 MPaG)

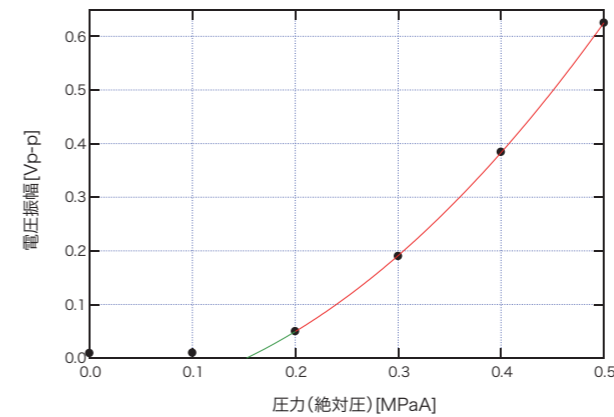
図9 常圧空気の場合の受信波形と低圧空気に対する計測精度評価

6.2 空気以外の気体に対する送受信波形

クランプオン超音波気体流量計の主な用途には空気(圧縮空気)の他に燃焼ガスがある。設備の都合で気体を流すことはできなかったが、パイプに燃焼ガスを詰めて送受信波形を観測してみたところ、0.1 MPaAでは気中伝播波がノイズに埋もれてしまっていたが、0.2 MPaAでは明瞭に観測することができた(図10(a))。燃焼ガスには都市ガス13Aを、配管としては40A Sch40ステンレス鋼管を用いている。



(a) 都市ガス13Aによる超音波受信波形 (絶対圧0.2 MPaA (0.1 MPaG))



(b) 都市ガス13Aによる超音波受信振幅

図10 都市ガスの場合の超音波受信波形と振幅

圧力を変えながら受信信号の振幅をプロットしたところ図10(b)のようになった。この結果、絶対圧で0.2 MPaA (ゲージ圧0.1 MPaG) 以上であれば流量計測の可能性があることが分かった。従来では1 MPaG以上の圧力が必要であった。

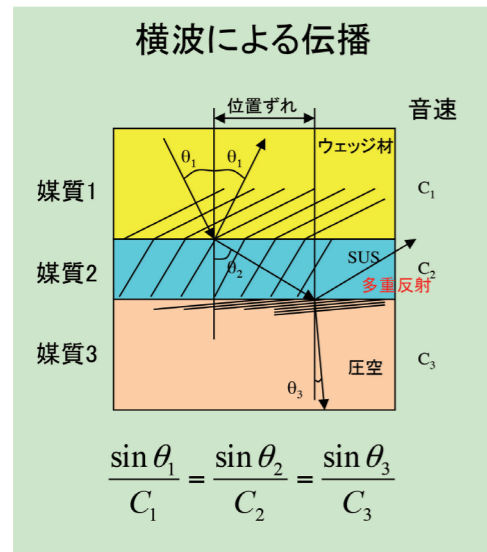
7. 考察

今回ウェッジから配管への入射角を臨界角を超える角度に設定することで良好な結果を得ることができたが、

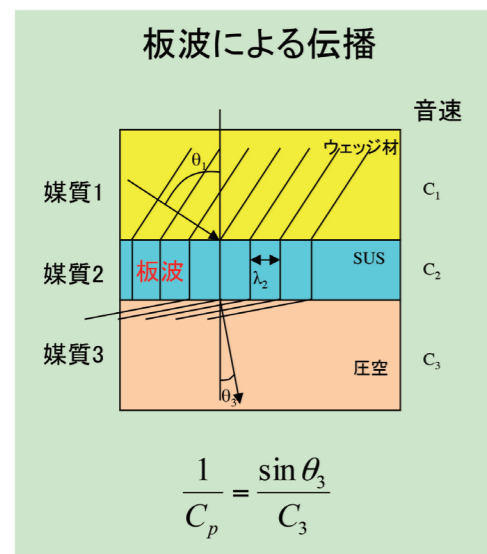
配管板材内部での超音波の伝播形態について考察しておくこととする。臨界角を超えていることから配管板材内部では縦波・横波などの実体波として伝播しているわけではない(図11(a))。実体波以外の伝播形態としては板波(ラム波)が考えられる⁽⁴⁾。板波は上下二つの境界を持つ板材を伝わるガイド波で、周波数 f [MHz]と板厚 d [mm]の積 fd [MHz mm]に応じて複数のモードを持つ(図12(a))。例えば、周波数が1 MHzで板厚が3 mmの場合、 fd は3[MHz mm]になる。この板材ではA0モードが励起されると位相速度は2.8 km/sとなり、S0モードが励起されると位相速度は3.3 km/sとなる。その間の位相速度は取らない。また、これらのモードを励起するのに適した入射角は図12(b)のようになる。 fd が3の時には、A0モードの場合は61°、S0モードの場合は48°になる。57°に合致したモードは存在しないが、比較的角度に近いA0モードが励起する可能性はある。

もし、配管中を板波として伝わっていると仮定すると、入射角を若干変化させても別のモードに移移するまでは位相速度はそのモードで決められる値に固定され、気体中での超音波ビームの角度は変化しないはずである(図11(b))。しかるに、入射角を54°、57°、60°と振って流量と伝播時間差との関係を調べたところ、④、⑤式から推定される θ_3 を元に計算した $\theta_3(=90^\circ - \theta)$ は図13に示すように連続的に変化した。図13には板波のA0モードとS0モードの場合の θ_3 についてもプロットした。板波では入射角を変化させてもモードが遷移しない限り θ_3 は固定であるため、板波として伝播しているとは考えにくい。また、板波であれば板に沿ってより遠くまで伝播されるようになるはずであり、受信信号波形が短くなることの説明ができない。さらに板の厚さを変更してみたが、 θ_3 は変化しなかった。板波であれば板厚を変えると fd 積が変わるため、位相速度が変わり θ_3 も変化するはずであるため、これも板波ではないことを示している。

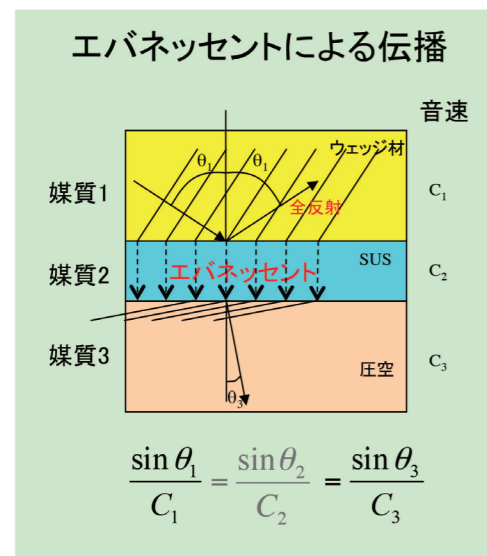
そこで、筆者らは配管板材部分での伝播形態をエバネッセントであると考えた。エバネッセントは、全反射面の裏側に波長オーダーの短い距離で波動が伝わるもので、光学の分野ではよく知られている現象である。エバネッセントであれば配管板材の一表面に生じた音圧分布が、振幅は小さくなるものの他表面にも同じように伝わりと考えられる。これにより、配管内部の流体にはウェッジから配管板材に伝わったのと同じ音圧分布が転写されることとなり、板材による影響を受けないため、受信波形の拡がりや低減されたことの説明ができる。エバネッセントの場合の配管板材前後での伝播は配管板材の部分の中抜きにしたスネルの法則(図11(c))で説明でき、図13の変化はこれにより説明できる。また、配管板材の厚さは超音波の1波長程度であることから、エバネッセントによる減衰は少なく、十分な振幅を保ったまま伝わりことができると推測している(配管板材の縦波音速は5790 m/s、横波音速は3141 m/sであり、超音波周波数が1MHzの時、波長はそれぞれ5.8 mm、3.1 mmとなる)。超音波の周波数を下げれば、より厚い板材の配管にも対応可能である。



(a) 横波による伝播



(b) 板波による伝播



(c) エバネッセントによる伝播

図 11 伝播形態と屈折角の関係

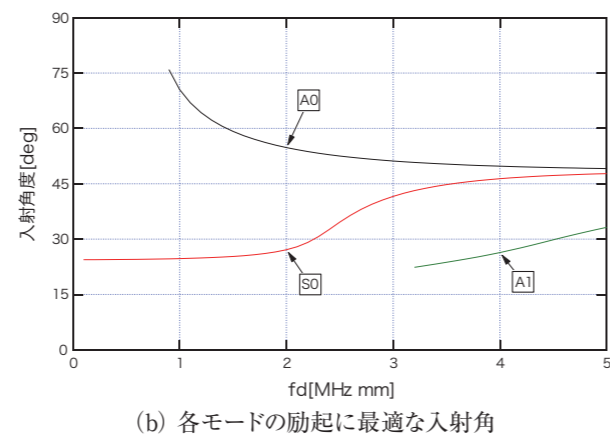
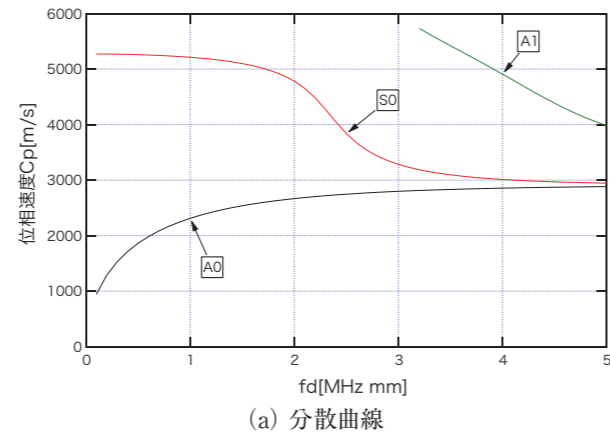


図 12 板波のモード

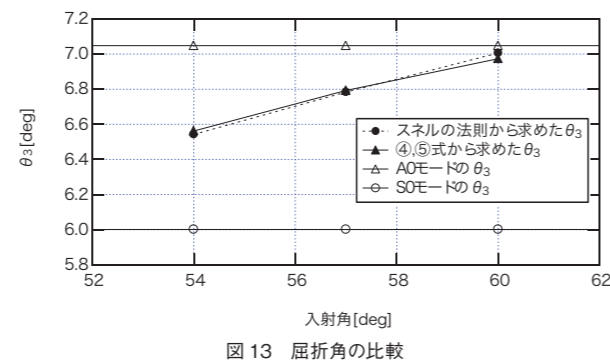


図 13 屈折角の比較

8. まとめ

臨界角を超える入射角を持つトランスデューサと高性能なダンピング材との組み合わせにより、配管の種類によっては常圧(0 MPaG)の空気に対してさえも計測可能なクランプオン超音波気体流量計を開発した。従来では0.41 MPaGまでが限界であった。また、空気以外の気体についても従来製品より低い圧力からの計測が見込めることが分かった。また、配管板材内での超音波の伝播形態はエバネッセントではないかと推測される。信号処理ではノイズに強く伝播時間差を精度良く求められる方法を開発した。

9. おわりに

配管の仕様はJISやANSIなどで決められてはいるもののクランプオン超音波流量計で測定することを前提に定められているわけではない。したがって、配管を製作する際の溶接跡や配管断面の真円度、配管表面の粗度などは配管ごとに異なる。現場によっては配管が塗装されていたり、表面がさびていたりする。また、流体の流れも脈動や偏流などが現場ごとに異なるのが常である。様々な現場でテストを行い、より広い条件下で安定して計測できるクランプオン超音波気体流量計を開発していきたい。

<参考文献>

- (1)特許EP 1 173 733 B1
- (2)山本 俊広 他, 新形超音波流量計「NEW TIME DELTAシリーズ」, 富士時報 Vol.73 No.10, 2000
- (3)福原 聡 他, 超音波流量計US350, 横河技報 Vol.48 No.1, 2004
- (4)Rose, "Ultrasonic Waves in Solid Media", Cambridge Univ. Press, 1999

<著者所属>

佐々木 宏 技術開発本部商品開発部
林 智仁 技術開発本部商品開発部