

超音波流量計 US350

US350 Ultrasonic Flowmeter

福原 聡^{*1}
FUKUHARA Satoshi

片岡 明^{*1}
KATAOKA Akira

請園 信博^{*1}
UKEZONO Nobuhiro

関口 敏夫^{*1}
SEKIGUCHI Toshio

伝搬時間差方式のクランプオン型液体用超音波流量計US350を開発した。信号処理に相関法を用い、相関値を正確に求めるためにヒルベルト変換を利用した。この相関法の採用により、気泡や混入物の存在下でも安定した流量計測を可能にした。また、個々のトランスデューサの特性に関する情報をセンサROMに持たせることにより、設置時のゼロ点調整を不要とした。さらに、最大4チャンネル(4測線2出力)の測定が可能で、チャンネル間の絶対値、加算/減算、平均値を任意に割り当て、仮想チャンネルから出力可能としている。

We have developed the US350 Clamp-on Ultrasonic Liquid Flowmeter using the transit-time method. This flowmeter employs a cross-correlation method for signal processing of transit-time detection and the Hilbert transform method for a precise measurement of cross-correlation values.

With the cross-correlation method, measurement capability against air bubbles or entrained solids in the fluid has been improved, and thereby realizing stable measurement. The characteristics of each transducer are stored in a sensor ROM, so that the ROM requires no adjustment of the zero flow condition when installed. In addition, four flow-input channels (1 output from 4 channels or 2 outputs from each set of 2 channels) are provided, and maximum two outputs of each current and pulse are available with two virtual channels to which the combinations of values of raw, absolute, addition, subtraction and the average of each channel are assignable.

1. はじめに

伝搬時間差方式のクランプオン型の液体用超音波流量計US350を開発した。外観を、図1に示す。超音波流量計は、流れの上流から下流へ超音波が伝搬した時間、下流から上流に伝搬した時間の差から流速を求める流量計である。なかでもクランプオン型の超音波流量計では、超音波の送受信器となるトランスデューサは配管の外側から配管材質を透過して流体内に超音波を伝搬できる。そのため、既存の配管に後から設置することが可能であり、大規模な工事が必要となる大口径の電磁流量計のリプレースで利用されるようになってきた。さらに、トランスデューサ部が接液しないため、腐食性の液体や高圧の流体を容易に測定することが可能で圧力損失も無いという特長もあり、食品、薬品、半導体の業界でも注目されている。

新型超音波流量計US350では、従来の超音波流量計の

課題点である気泡や混入物による外乱に強い信号処理方法として、相関法を採用した。また、流速分布が不均一で変化の大きな流れに対しても安定した測定ができるよう、最大4測線2出力を可能にした。さらに、従来機種のリプレースを意識し、多重レンジ切換機能や各種アラームを用意し、幅広いニーズに対応できるようにした。



トランスデューサ

変換器

*1 制御プロダクトフィールド機器事業部 第1技術部

図1 US350 外観

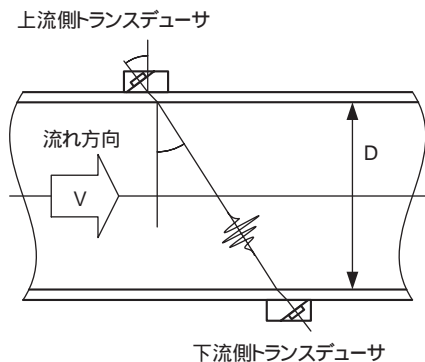


図2 原理図

2. 測定原理

図2に、US350の基本的な測定原理を示す。

管壁に取り付けられたトランスデューサは、超音波パルスの送受信を行う。流体を伝搬する超音波は流体中での音速と流速の影響を受け、反対側のトランスデューサで検出される。上流側トランスデューサから下流側へ伝搬するのに要した時間を T_1 、逆向きの伝搬に要した時間を T_2 、流体中での超音波の音速を C_0 、トランスデューサ内部と配管部での伝搬時間を t 、流体の流速を V とすると、超音波の伝搬時間 T_1, T_2 は、

$$T_1 = (D / \cos \alpha) / (C_0 + V \sin \alpha) + t$$

$$T_2 = (D / \cos \alpha) / (C_0 - V \sin \alpha) + t$$

となる。さらに、トランスデューサの材質における超音波の音速を C_s 、トランスデューサの超音波射出角度を α とすれば、snellの法則、 $C_0 / \sin \alpha = C_s / \sin \alpha$ を利用して流速 V を求めると、

$$V = (C_0 / \sin \alpha) \cdot (T_2 - T_1) / (T_2 + T_1 - 2 \cdot t)$$

$$= (C_s / \sin \alpha) \cdot (T_2 - T_1) / (T_2 + T_1 - 2 \cdot t)$$

の式で求められる。これは、流速が伝搬時間とトランスデューサの特性のみに依存し、流体の音速に依存しないことを意味している。従って、流体の温度変化による音

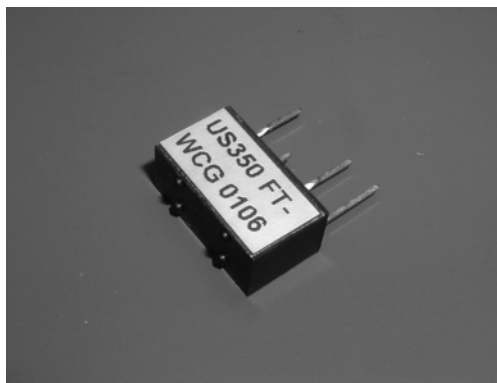


図3 センサROM

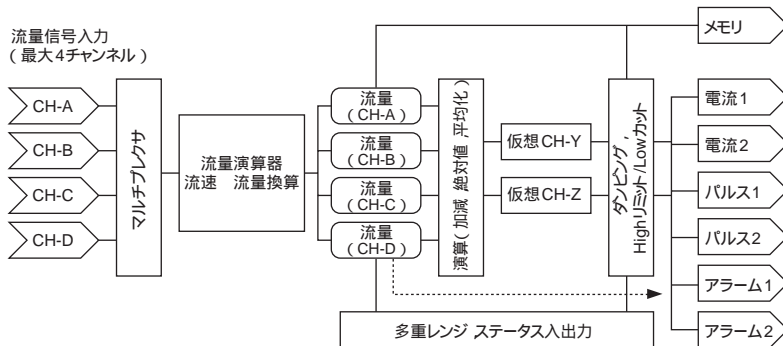


図4 変換器入出力部の構成

速変化の影響を受けにくく、安定した測定が可能となっている。

3. 構成

3.1 トランスデューサ

トランスデューサはステンレス(SUS316)のケースに収められており、内部に圧電素子が組み込まれている。また、トランスデューサには個別に実流校正が行われ、個々のトランスデューサと組み合わせられるセンサROM(図3)に、前述したトランスデューサ情報が補正用データとして書き込まれている。このセンサROMにより、設置時のゼロ調は不要になり、トランスデューサの交換もセンサROMとセットで自由に行える。

また、オプションで一時的に水没可能な水中型(IP68相当、標準はIP67)のトランスデューサも用意している。

3.2 変換器

変換器のハウジングは、標準の耐水形(IP66)と、オプションで防浸型(IP67相当)を用意している。また、操作パネルにはカーソルキーを兼ねた10キーと大型のLCDを備え、対話型の設定値入力を可能としている。

US350の入出力部の構成を、図4と表1に示す。各測線(チャンネルと呼ぶ)の信号はマルチプレクサを介して流量演算が行われる。仮想チャンネルYとZには、各チャ

表1 US350の入出力

	点数	機能	仕様
流量信号入力	1,2,4点	トランスデューサ入力	
電流出力	1,2点	4 ~ 20 mA 出力	
接点出力 (オプション)	4点	パルス アラーム 多重レンジ切換状態 正逆流量状態	オープンコレクタ 30 VDC/0.2 A 付加仕様
接点入力 (オプション)	2点	多重レンジ切換 0%シグナルロック 積算値リセット	無電圧接点 付加仕様

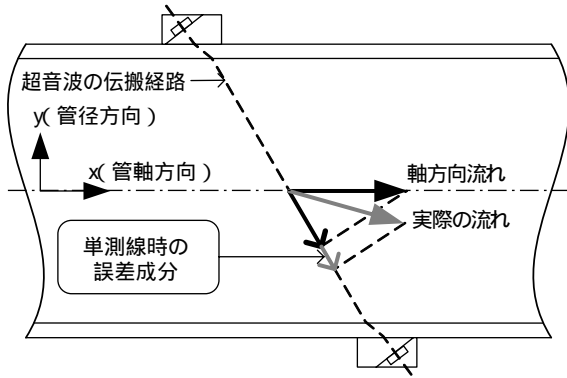


図5 流れの不均一性

ンネルでの測定値の加減算，絶対値，平均値を任意に割り当てることが可能である。仮想チャンネルの演算結果は，任意の電流またはパルス出力に割り当てられる。電流出力は最大2点まで，パルス出力は4点まで実装できるため，例えば2測線の入力の一つの配管に割り当てて電流1として出力し，残りの2測線の入力を別の配管に割り当てて電流出力2として出力することも可能である。

3.3 4 測線測定

US350では，最大4測線での測定が可能となっている。4測線を一つの配管に設置し測定値を平均化することにより，流速分布が不均一で変化の大きな流れの影響を緩和することができる。図5に示すように，配管内の実際の流れは流量を求めたい管軸方向流れ(図中のx方向)ばかりでなく，管径方向(y方向)流れ成分も存在する。超音波流量計では超音波の伝搬経路に沿った流速を測定するため，単測線時には径方向成分の流速による誤差が生じる。この影響を低減するには，対向する位置にトランスデューサを設置し，複数の測線での測定を行うのが効果的である。

図6に，非常に流れの乱れの大きい現場での4測線の

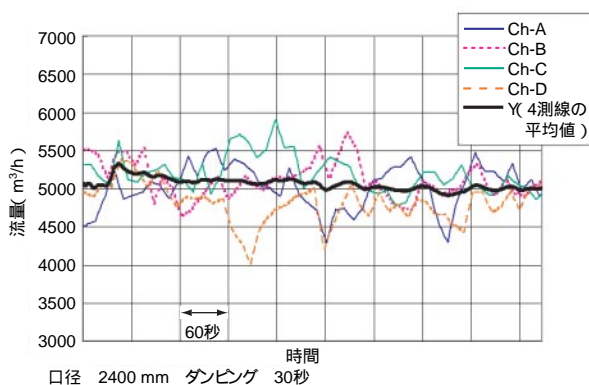


図6 各測線の測定値の時間変化

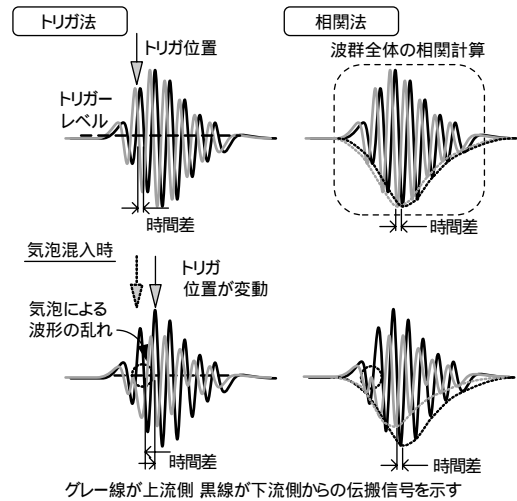


図7 トリガ法と相関法(概念図)

効果を示す。チャンネルA～Dの信号は単測線での計測結果で，仮想チャンネルYはそれらの4測線の平均値を割り当てた。この結果から，ゆらぎの大きな流れに対し4測線とすることで安定した出力が得られることがわかる。

3.4 相関法とヒルベルト変換

US350では，流速を求めるための時間差を算出するのに相関法を用いている。従来この時間計測には，一般的にはトリガ法が用いられてきた。トリガ法では，受信波に対し一定のトリガレベルを設定し，受信信号がその値を一定回数超えた時刻を求めるといった算出方法である。この場合，図7のように気泡などの外乱で受信波形に乱れが生じるとトリガの位置がずれるため，時間測定に大きな誤差が生じていた。一方，相関法では，ある時間幅に存在する波形全体の相関を取るため，一時的に波形の乱れがあっても波形全体に与える影響が小さく，結果的に誤差を小さくすることができる。

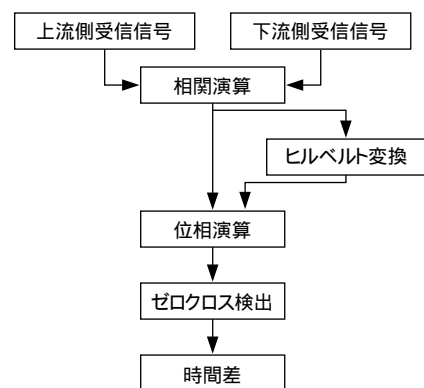


図8 時間差演算部構成

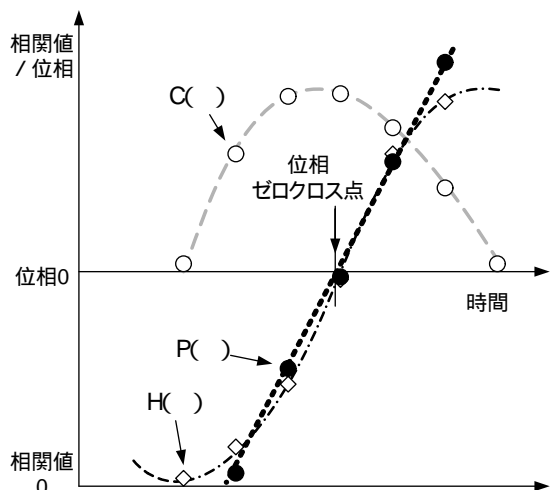


図9 相関の最大値検出の概念図

図8に、US350の時間差演算部の構成を示す。相関法による時間差の算出は、上流から下流、下流から上流への2つの受信波を時間をずらしながら相互相関値を求め、その相関値のピークから正確な時間差、つまり流速を算出する。相関結果からピークを求めるために、US350ではヒルベルト変換を利用している。

上流/下流の受信波の実際の伝搬時間差を δ 、受信波を一樣な周波数 f_0 を持つ正弦波、 θ を $[0, 2\pi]$ で一樣分布する確立変数とすると、この相互相関関数 $C(\tau)$ は、

$$C(\tau) = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2\pi} \cdot [\sin(2\pi f_0 t + \theta + \delta) \cdot \sin[2\pi f_0 (t + \tau) + \theta]] d\theta$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \cos(\delta - 2\pi f_0 \tau)$$

となる。次に、この相互関数 $C(\tau)$ のヒルベルト変換 $H(\tau)$ を求めると、

$$H(\tau) = \frac{1}{2} \cdot \sin(\delta - 2\pi f_0 \tau)$$

となる。ここで両者の位相を $P(\tau)$ とすれば、

$$P(\tau) = \tan^{-1}(H(\tau)/C(\tau))$$

$$= 2\pi f_0 \tau - \delta$$

となり、位相 $P(\tau)$ のゼロクロス点が求める相関の最大値となることがわかる。図9に、相関の最大値検出の概念図を示す。

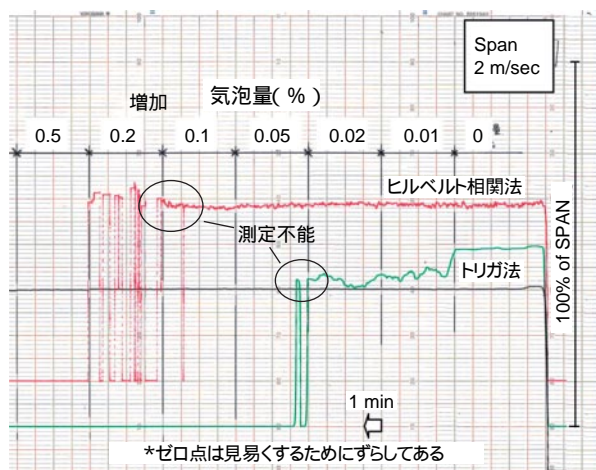


図10 気泡量と検出限界

超音波流量計ではA/D変換による離散化されたデータを元に相関の最大値検出を行うが、従来のカーブフィッティング法では、低次のカーブで計算すると誤差が大きく、高次のカーブで計算すると多くのデータが必要となる。このヒルベルト変換を用いた時間差法では、カーブフィッティングを行う代わりに、相関値とヒルベルト変換で求められる位相の一次近似のゼロクロス点を求めればよく、簡単な計算で精度良く時間差が算出可能となる。

図10に、気泡のある流れでのトリガ法とヒルベルト相関法の検出限界の比較結果を示す。トリガ法ではわずかに気泡が入るだけでも測定値に大きな影響が生じ、気泡の量が0.05%程度で既に出力が不安定になっているが、ヒルベルト相関法では0.2%程度の気泡量まで安定して測定ができていることがわかる。

4. おわりに

US350は、従来のクランプオン型の超音波流量計の特長を生かしつつ、さらに以下の特長を備えた。

- ・4測線の採用により、測線毎の流速変動を軽減し、安定した計測を実現した。
- ・流速演算にヒルベルト変換を応用した相関法を採用することにより、気泡や外乱に対して安定した測定を可能とした。
- ・センサROMにより、設置時のゼロ点調整を不要とし、設置作業を容易にした。

なお、当社には、今回説明したUS350に加え汎用型のUS300シリーズもあり、同じ相関演算方式を採用している。