# ハイブリッド超音波流量計

矢尾 博信(やぉ ひろのぶ)

平山 紀友(ひらやま のりとも)

大室 善則(おおむろ よしのり)

# 1 まえがき

近年,超音波パルスドップラー流速分布法(UVP法) の工業流量計測への応用に関する報告が見られるように なった。UVP法は直接流速分布を測定するために, 伝搬 時間差法など他の測定原理で必要な補正係数が不要であり, 非成長流れにおいても高精度測定が可能である。したがっ て,従来の伝搬時間差法にて適用が困難であった高粘性流 体,気泡やパーティクルなど異物が混入した流体の高精度 非接触測定が可能となり,電磁流量計や容積式流量計など 他方式流量計の適用分野への応用が考えられる。また,流 速分布をリアルタイムに測定できることから,設備診断 ツールへの応用も考えられる。しかし,測定原理からくる 制約がある。第一に,十分なエコー信号を得るために,測 定流体内には流動場のトレーサとなる気泡やパーティクル などの反射体が必要不可欠である。第二に,サンプリング 定理の制約のために,測定可能な最大流速は,他の測定原 理(伝搬時間差法:32 m/s や電磁式:15 m/s など)と比 較して低い傾向にある。第三に,超音波トランスデューサ 近傍の音響ノイズの影響により,直径全域にわたる流速分 布の測定が難しい。

一方, 伝搬時間差法は, 測定流体に非接触な工業用超音 波流量計として広く使用されている。伝搬時間差法は, 一 般的に超音波を測定流体中で透過させるため, 半導体分野 で使用される超純水などの清浄な流体の測定に適している。 気泡混入がない場合,測定可能な最大流速に制限はない。 しかしながら同様に幾つかの制限がある。第一に, 平均流 速を計算するための換算係数が必要であり, この換算係数 は十分に発達した流れを仮定している。第二に, ディジタ ル信号処理技術の適用により耐気泡性能は向上したものの, 大量の気泡を含んだ場合や高濁度の液体など, すべての液 体の流量測定に適用できるほど強くはない。

以上のように,それぞれの測定原理には長所と短所があ るが,それらは相互補完的な関係にある。今回,世界に先 駆けて UVP 法と伝搬時間差法を使用できるハイブリッド 超音波流量計を開発した。本流量計では,一対のクランプ オン形の超音波トランスデューサを,測定配管に対向させ て設置する構成とした。この設置により,UVP法による 直径全体にわたる流速分布の測定と同時に,伝搬時間差法 による測定も可能となる。測定流体の状態や測定流速に応 じて,測定法を切り換えながら測定することを可能とした。 以下,開発した流量計の主な仕様と構成について述べる。

# 2 新ハイブリッド超音波流量計

現在,工業用超音波流量計に採用されている測定原理に は,伝搬時間差法とドップラー法(ただし,流速分布を測 定できない。以下,旧ドップラー法と呼ぶ)がある。伝搬 時間差法は,比較的高精度(±1%)の測定が可能である が,気泡やパーティクルが多く混入した液体の測定には向 かない。他方,旧ドップラー法は,伝搬時間差法と比較し 気泡やパーティクルの混入に強いが,測定精度が劣る(± 3~5%)。

今回, UVP 法と伝搬時間差法のいずれかの測定原理で 流量測定が可能な新タイプのハイブリッド超音波流量計を 世界で初めて開発した。図1に測定原理を示す。

伝搬時間差法は,配管内の流体を斜めに横切る経路で超 音波パルスを往復させる。超音波パルスが上流から下流に 伝搬する時間と逆に,下流から上流に伝搬する時間の差か





# **B**

フィールド機器,特に流量計・発 信器の設計・開発に従事。現在, 富士電機インスツルメンツ(株)セ ンサー機器技術部主査。計測自動 制御学会会員。

矢尾 博信



平山 紀友

工業用計測機器,光応用機器の研 究開発に従事。現在,富士電機ア ドバンストテクノロジー(株)機器 技術研究所副主任研究員。ISA 会 員。



大室 善則

ファームウェアの研究開発に従事。 現在,富士電機アドバンストテク ノロジー(株)情報通信制御部主任。

# 表1 ハイブリッド超音波流量計の主な開発仕様

		UVP法	伝搬時間差法
機能	検出器取付法	クランプオン	
	測線数	2~4測線	1~2測線
	適用配管口径	25~1,000 mm	13~6,000 mm
	適用配管材質	金属管,ライニング管,プラスチック	
	測定範囲	0~±0.3±4m/s	0 ~ ± 0.3 ± 32 m/s
	測定温度	- 40~ + 100	
	出力	DC4~20 mA(負荷1 k ) 接点:3点,RS-232C/RS-485	
	防爆	ATEX EEx m T6	
性能	精度	±0.5% of rate	±1% of rate
	直管長	上流5D,下流2D	上流10D,下流5D
	応答性能	0.1 s	0.5 s
	気 泡 量	0.02~20vol.%	0 ~ 1 2 vol.%
	非成長流れ	適用可能	適用不可

ら流量を測定する方式である。

Q=( D<sup>2</sup>/4)(1/K){C/(2sin )}{ T/(T₀ - )}.....[1] ここで,Q:体積流量,D:配管内径,K:平均流速 の換算係数,C:測定流体の音速, :測定流体への入 射角, T:伝搬時間差,T₀:静水時の伝搬時間, : 配管およびトランスデューサ内の伝搬時間である。

他方,UVP 法は,流体中に含まれる気泡やパーティク ルが流体と同じ速度で移動すると仮定し,気泡やパーティ クルの移動速度から流体の流量を測定する方式である。気 泡やパーティクルなどのトレーサに反射された超音波の周 波数がドップラー効果により変化することから,伝搬経路 上の各部のドップラー周波数を計測し各部のトレーサの移 動速度を測定する。

$Q = \iint v(x)  dS  \dots$		 	2	•
$v(x) = \{C/(2\sin x)\}$	)}{ $f_d(x)/f_0$ }	 	3	
x = (Ct)/2		 	4	•

ここで, *v*(*x*): 位置 *x*における流速, *f*<sub>d</sub>(*x*): 位置 *x*におけるドップラーシフト周波数, *f*<sub>0</sub>: 基本励振 周波数, *t*: トランスデューサと位置 *x*間の超音波パ ルスの往復時間, その他の記号は式 1 と同じである。

今回開発したハイブリッド超音波流量計の主な開発仕様 を表1に示す。

3 流量計の構成

図2に今回開発した流量計の構成を示す。流量計は,配 管表面に設置する検出部と信号処理を行う変換器から構成 される。

# 3.1 変換器

図3に今回開発した流量変換器のハードウェアのブロック図を示す。ハードウェアは,計測ボード,制御ボード, 設定ボード,および電源ボードの四つの部分から構成され

# 図2 システム構成







る。

#### [1] 計測ボード

ー対の超音波トランスデューサに送信信号を与え,受信 信号(エコー波,または透過波)を増幅後,A-D変換し, ディジタル信号処理を行って流量演算を行う。

2 制御ボード

入力(くさび温度信号,キー入力),出力(DC4 ~ 20 mA,接点),通信(シリアルインタフェース)および液 晶表示の制御を行う。

(3) 設定ボード

配管や測定流体パラメータの表示・設定を行う。

4 電源ボード

各ボードへ電源の供給を行う。

# 図4 検出器の構造



図5 一対のトランスデューサによる計測



#### 3.2 検出器

図4に今回開発した検出器の構造を示す。UVP法に使用される超音波トランスデューサにはコンポジット振動子が採用されているが,検出器の低コスト化と流量計の使用流体温度範囲(-40~+100)を考慮し,PZT(圧電セラミックス)円板振動子を採用した。振動子の背面層構造を最適化し,円板振動子の採用にもかかわらずコンポジット振動子を使用したトランスデューサと同程度以上のLow-Q化を実現した。

また,広い流体温度範囲で高精度測定を実現するために くさびに温度センサを付け,くさび音速の温度補正を行う とともに,流速演算の自動温度補正を可能にした。図5に 示すように一対のトランスデューサを対向設置にすること で,直径全域にわたる流速分布の測定を可能とし,同時に 伝搬時間差法のトランスデューサとしても使用できる構成 とした。したがって,センサの設置替えを行うことなく, 同一センサによる伝搬時間差法での測定が可能である。

さらに,UVP法における誤差の要因の一つである配管 内の多重反射の影響を低減するために,トランスデューサ 前方に干渉波除去ユニットを設置できる構成とした。



# 4 測定方式の切換

本製品は,上記構成とすることによりUVP法と伝搬時 間差法の両方で測定することが可能となった。したがって, 液体内に十分な反射体がなくエコー信号が得られない場合 や流速が速くUVP法の測定範囲を超える場合は,伝搬時 間差法に切り換えて測定する。また,伝搬時間差法での測 定の場合,気泡やパーティクルの混入量が増え測定が困難 になった場合にUVP法に切り換え,測定を継続する。こ のように,測定方式の自動切換を行って,両方式の相互補 完的な特質を利用すれば,時刻や時期により状態変化する 液体の流量計測が可能となり,より広範囲なアプリケー ションへの適用が可能になる。

図6に今回検討した切換アルゴリズムの概要を示す。パ ラメータの設定(配管の材質,口径,肉厚,測定流体の種 類,最大流量など)を行いUVP法の測定範囲にあるか判 定し,測定可能範囲であればUVP法の測定を開始する。 測定状態を判定し正常な測定が行われている場合は測定を 継続する。設定されたパラメータや測定結果から測定可能 範囲を超える,あるいは正常な測定が行われていないと判 定された場合は伝搬時間差法へ切換を行う。伝搬時間差法 で測定を行う場合は,透過受信波の状態を判定し,受波異 常と判定された場合,異常処理を行う。この切換アルゴリ ズムの採用により,測定流体の状態が変化した場合におい ても,測定法を自動的に切り換えながら流量計測すること ができる。

# 5 実流試験

流量計を使用した精度評価試験を実施した。使用した配管は,口径100Aで材質SUS(ステンレス鋼),CS(炭素鋼)の2種類の材質について評価試験を実施した。測定に

# 図7 試験ループの概要



図8 精度試験(ステンレス鋼管)



#### 図9 精度試験(炭素鋼管)



使用した試験ループの概要を図7に示す。試験に使用した パイプの上流に整流板を設置し,整流板から7Dの位置に 検出器を設置し測定を行った。評価は比較法により実施し た。マスタメータとして,下流側に設置されている電磁流 量計を使用した。この電磁流量計は,質量法により各流量 ポイントで±0.1%以内に校正されている。測定流体は水 を使用し,トレーサとして気泡を使用した。空気をポンプ の吸込口から入れ,ポンプで破砕した。気泡の混入率は, 流量により0.02~0.2 vol.%程度である。

上記試験装置を使用して流速 0.2 ~ 2 m/s の範囲で実流 試験を実施した結果を図 8 , 図 9 に示す。流速 0.4 m/s 以 上の範囲ではおよそ ± 1 % of rate 以内の精度が得られ , 流速 1 m/s 以上の範囲ではおよそ ± 0.5 % of rate 以内の精 度が得られた。

#### 図10 流速分布(ステンレス鋼管)



また,超音波トランスデューサを対向設置し二つのトラ ンスデューサを切り換えながら流速分布の測定を実施した。 口径100Aのステンレス鋼管を使用し,流速2m/sの測定 した流速分布の例を図10に示す。クランプオン設置であり ながら,測定管の直径全域にわたり流速分布が測定されて いることが分かる。

# 6 あとがき

今回,世界に先駆けて UVP 法と伝搬時間差法を組み合わせた工業用のハイブリッド超音波流量計の開発を行った。本流量計により従来,気泡や異物の混入のため伝搬時間差法による安定な測定が困難であった用途,例えば気泡を多く含んだ水や異物を含んだ排水などへの適用や,食品分野における製品や原料の高粘性流体や,パルプを含んだ流体の計測など,より広いアプリケーションへの適用が期待できる。さらに,流速分布がリアルタイムに測定できることから,設備診断やメンテナンスツールへの応用も考えられる。今後はさらに改良を重ね洗練された製品に仕上げていくとともに,UVP 法の技術を核とした製品開発を行っていく所存である。

#### 参考文献

- 1. Takeda, Y. Velocity profile measurement by ultrasound Doppler shift method. Int. J. HEAT & Fluid Flow. vol.17, no.4, 1986, p.313-318.
- 2 Mori, M. et al. Development of a novel flow metering system using ultrasonic velocity profile measurement. Exp. Fluids. vol.32, 2002, p.153-160.
- [3] 山本俊広.可搬形超音波流量計「ポータフローX」.富士 時報.vol.68, no.9, 1995, p.497-500.
- [4] 山本俊広ほか.新形超音波流量計「NEW TIME DELTAシリーズ」.富士時報.vol.73, no.10, 2000, p.537-541.
- [5] 山本俊広.超音波流量計 M-Flow.超音波 TECHNO. vol.5, no.6, 2002.



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する 商標または登録商標である場合があります。