再変調による消去法を用いた中心周波数検出形 FM 超音波流量計[†]

谷 澤 茂*・廣 瀬 治 男*・吉 久 信 幸**

Central Frequency Detecting Type FM Ultrasonic Flowmeter Using Regenerative Modulation Elimination Method[†]

Shigeru TANISAWA*, Haruo HIROSE* and Nobuyuki YOSHIHISA**

This paper reports on a new measuring principle and measurement accuracy of FM ultrasonic flowmeter which utilizes the elimination method of FM components to detect the phase difference between the transmitter carrier signal and the FM eliminated received signal. FM ultrasonic signal is used for the field stabilization, and examination experiments for the stabilization of the FM sound fields in a measuring pipe are also reported. The stabilization method is the one similar to the so-called warbletone that is used in the indoor measurement of the sound pressure. The proposed measuring method is higher in sensitivity than the method to detect the modulated signal component because the flow rate is measured by the central frequency (say, 183 kHz) component of FM ultrasonic. To eliminate FM components with simple electronic circuits that can eliminate FM components in accordance with change of modulation has such advantage that there is no restriction on the modulation index. Next, it is specified through an experiment that the FM ultrasonic gives the sound wave stabilized for the measurement in a pipe because of decreasing in standing wave ratio. The resultant accuracy was good (error: about $\pm 1\%$) for a small flow rate. Therefore, it can be concluded that the present FM ultrasonic flowmeter is with sufficient stability and high sensitivity.

Key Words: ultrasonic flowmeter, FM ultrasonic, central frequency, regeneratively modulated signal, warbletone

1. はじめに

周波数変調した超音波(以後, FM 超音波と呼ぶ)を流量計に利用した報告例はかなり少ない。これは, 信号の瞬時位相値が変化するため, 位相差や時間差の検出に適切でないと考えられていたからであろう。しかし, 室内の音圧測定に用いられているウォーブルトーンも瞬時位相値が変化する FM 音波であり, 共鳴現象を低減し, 測定精度を向上させる目的で利用されている。一方, 超音波流量計の精度や安定度は, 測定用の電子装置の性能に大きく左右される。これに用いられる集積回路や電子部品などの諸性能は, 近年大幅に向上している。そのため, 従来では困難であった技術も徐々に可能になってきている。過去の FM 超音波を利用した流量計の例

として, 多重反射信号を除去する技術が報告されている^{1),2)}。この報告では, 多重反射信号の周波数が流量に比例した周波数差のデータの奇数倍となるため, フィルタによって多重反射信号が除去できる。しかし, 測定精度と変調指数が直接的に比例する関係にある, 変調信号に相当する信号から流量を検出しているため低感度である, FM 変調器の高い直線性と安定度が必要であるなどの問題点も有していた。一方, 高い尖鋭度(Q)のトランスデューサ(振動子)による FM 方式の流量計の不安定性も問題視されていた²⁾。このように著者の知る限りでは, 実用的な精度と安定度を有する FM 方式の流量計は見当たらなかった。以前, 著者らは FM 超音波の中心周波数成分(搬送波信号)から流量を検出する高感度な流量計を報告した³⁾。しかし, 変調指数の値に制限($\pi/2$ 以下)があり, 装置の構成も複雑であった。そのため著者らは, 同じ中心周波数による検出方法を用いて, 構成が容易な再変調方式の FM 成分消去法を本論文で提案している。更に, 流速に対する感度の向上のために, 文献 3) の装置に比べて約 8 倍の中心周波数の FM 超音波を使用することによって, 感度も約 8 倍にしている。また本測定法で用いた FM 変調は音場の安定化のために使用しており, 測定精度と変調指数が直接的に比例していないという長所がある。実験した送・受信装置の共振部は, 高い尖鋭度にならないように構成した。結果として, 十

[†] 第 37 回 SICE 学術講演会で発表(1998.7)

第 16 回流体計測シンポジウムで発表(1999.1)

* 日本工業大学電気電子工学科

埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1

** 中央大学理工学部電気・電子工学科

東京都文京区春日 1-13-27

* Nippon Institute of Technology, Minamisaitama, Saitama

** Chuo University, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received June 9, 1998)

(Revised February 2, 1999)

分な安定性と精度を有する FM 方式の超音波流量計が得られた。本報告では、FM 超音波の音場の安定化の効果を検証するための実験、位相差法を用いた中心周波数検出形の FM 超音波流量計の測定原理・構成例・諸性能の検証に関する実験結果などについて述べる。

2. 流量測定および FM 成分消去の原理

本論文提案の FM 超音波流量計は、流体中では FM 超音波を用いて音場を安定化しているが、受信信号に含まれている FM 成分を受信装置内で消去し、中心周波数成分の信号を得ている。この単一周波数になった新しい受信信号の位相から、流量を検出している。そのため、FM 変調の影響による瞬時流量データ値の変化は生じない。本章では、再変調方式の FM 成分消去の原理、位相差法を用いた流量測定の原理などについて述べる。ただし、受信信号の振幅は受信装置内で一定化してある。そのため理論式の導出にあたり、通常の超音波流量計と同様に、受信信号の振幅変化による位相データへの影響はないものとする。

本測定法では、測定装置の構成が容易になるように変調信号として余弦波信号を用いた。余弦波を使用することによって、ランプ信号による FM 変調²⁾と比較して、FM 変調器や混合器に要求される広い直線性や高い安定度などの諸条件がかなり緩和され、回路の構成が容易になる。この FM 送信信号(超音波)は、送信用搬送波信号を(1)式とすると(2)式で表される⁴⁾。

$$E_{TC} = A_0 \cos [\omega_0 t + \theta_0] \quad (1)$$

A_0 : 振幅, ω_0 : 搬送波信号の角周波数, θ_0 : 搬送波信号の初期位相。

$$E_{TFM} = A_0 \cos [\omega_0 t + \beta_T \sin (\omega_p t + \phi_0) + \theta_1] \quad (2)$$

β_T : 送信信号の変調指数, ω_p : 変調信号の角周波数, ϕ_0 : 変調信号の初期位相, θ_1 : FM 送信信号の初期位相。流体温度の変化を補正するために、(2)式の FM 送信信号を1組切替方式で上流と下流方向へ放射するものとする。そのとき、トランスデューサで受信される上流方向の FM 受信信号は(3)式、下流方向の FM 受信信号は(4)式となる。ただし、トランスデューサや受信装置の共振部の周波数特性、諸条件の変化による流体の諸性質の変化などによって、FM 受信信号の変調指数が変化することが考えられるため、受信信号の変調指数を β_R とした。

$$E_{RFMu} = A_1 \cos [\omega_0 [t - L/(C - V \cos \theta)] + \beta_R \sin \{\omega_p [t - L/(C - V \cos \theta)] + \phi_0\} + \theta_1] \quad (3)$$

$$E_{RFMd} = A_1 \cos [\omega_0 [t - L/(C + V \cos \theta)] + \beta_R \sin \{\omega_p [t - L/(C + V \cos \theta)] + \phi_0\} + \theta_1] \quad (4)$$

A_1 : 振幅, L : 超音波の伝搬距離, C : 静止流体中の音速, V : 超音波伝搬経路内の平均流速, θ : 流速方向と超音波の伝搬方向とのなす角度。

受信信号に含まれる FM 成分を、再変調することによって消

去するために、まず(3)式と(4)式の信号を FM 検波して、受信変調信号成分を検出する。更にその信号を π 移相すると、上流方向の信号が(5)式、下流方向の信号が(6)式となる。ただし、 B_1 は振幅であり、初期位相角が ϕ_0 になるように位相値を調整するものとする。

$$E_{RSu\pi} = -B_1 \beta_R \cos \{\omega_p [t - L/(C - V \cos \theta)] + \phi_0\} \quad (5)$$

$$E_{RSd\pi} = -B_1 \beta_R \cos \{\omega_p [t - L/(C + V \cos \theta)] + \phi_0\} \quad (6)$$

(3)式を搬送波信号、(5)式を変調信号として再び FM 変調すると、FM 変調成分を消去した新しい上流方向の受信信号(7)式が得られる。同様に(4)式を搬送波信号、(6)式を変調信号として、下流方向の新しい受信信号(8)式が得られる。ただし A_1 は振幅で、初期位相角が θ_0 になるように位相値を調整する。この原理に基づいた FM 成分消去処理用の回路のブロック図を Fig. 1 に示しておく。

$$E_{RCu} = A_1 \cos [\omega_0 [t - L/(C - V \cos \theta)] + \theta_0] \quad (7)$$

$$E_{RCd} = A_1 \cos [\omega_0 [t - L/(C + V \cos \theta)] + \theta_0] \quad (8)$$

(7)式と(8)式は、角周波数 ω_0 の搬送波信号成分(FM 受信信号の中心周波数成分)のみになっており、FM 成分が消去されている。そのため、流速(流量)は、通常の位相差法によって得られる。すなわち、(1)式の送信用搬送波信号と(7)式あるいは(8)式の新しい受信信号との位相差を測定すると、上流方向の位相差が(9)式、下流方向の位相差が(10)式となる。ただし、 $\omega_0 = 2\pi f_0$, n は超音波の伝搬経路内に含まれる波長の数(切り捨て整数値)で、上流方向と下流方向の超音波の伝搬は同一波長数内にあるものとする。

$$\Delta\phi_u = 2\pi L f_0 / (C - V \cos \theta) - 2n\pi \quad (9)$$

$$\Delta\phi_d = 2\pi L f_0 / (C + V \cos \theta) - 2n\pi \quad (10)$$

したがって、超音波伝搬経路内の平均流速 V は(11)式となるため、瞬時体積流量 Q は k を流量補正係数、 D を測定管の直径として(12)式で表される⁵⁾。

$$V = (\pi L f_0 / \cos \theta) [(\Delta\phi_u - \Delta\phi_d) / \{(\Delta\phi_u + 2n\pi) \cdot (\Delta\phi_d + 2n\pi)\}] \quad (11)$$

$$Q = (\pi D^2 / 4k) V \quad (12)$$

このように、受信信号から FM 成分を消去できるため、単一周波数の信号となり、通常の時間差法や位相差法で用いられている流体温度変化の補正法が使用可能となる。提案した再変調による FM 成分消去法は、電気通信で用いられている位相偏移変調(PSK)における同期搬送波再生方法に類似し

Fig. 1 Detailed block diagram of the FM component elimination circuit.

た手法である。本 FM 成分消去法は、著者らがすでに提案した加算処理による FM 成分の消去法³⁾と比べて、以下のような特長を有している。

- (1) 変調指数の値に理論的な制限がない(以前の消去法では $\pi/2$ 以下であった)。
- (2) FM 受信信号の変調信号成分を直接検出しているため、この信号成分に波形ひずみが発生しても、消去可能である。更に、変調指数が変化しても、その大きさに追従して自動的に消去できるため、ほぼ完全に FM 成分を消去できる(以前の消去法では考慮していない)。
- (3) FM 成分消去のための電子回路がかなり簡単になった。

位相差法で流量を測定すると、その感度は使用する超音波信号の周波数に比例する。本測定法はこの位相差法を用いており、FM 超音波の中心周波数成分から流量を検出しているために、文献 1), 2) のように変調信号成分から流量を検出する方法に比べて、かなり高感度になることが予想できる。

3. 管内音場の安定化に関する実験

本章では、FM 超音波による音場の安定化の効果を測定管内で実験的に検証する。室内で音圧特性の測定に用いられているウォーブルトーンは、室内の壁からの反射波によって、室内の特定の基準姿態と共鳴して著しい特異現象の発生を抑圧できる方法である^{6), 7)}。その安定化の効果は、室内の音圧測定に広く用いられていることから明白であると考えられる。しかし、超音波流量計では細長い管内での音場であり、周波数も高いため、FM 超音波の音場の安定化の効果が明白でないところもある。そのため管内の音圧を測定し、その定在波成分の量を検討することによって、その効果を検証することにした。実験では、音波伝搬媒質(水)の諸変化やトランスデューサの温度特性などが測定データに微妙な影響を与えるため、1 回の測定が約 25 秒程度の短時間で実施できるように実験装置を自動化し、無響室内で測定した。その音圧測定装置の概略図を Fig. 2 に示す。管内の音圧は、長さ 3 m の測定管の上部に幅 12 mm、長さ約 1.2 m の測定用の窓を設け、直線運動軸受けのスライドユニット上に固定したトランス

Fig. 2 Experimental system for sound pressure in the pipe.

デューサをモータによって移動して、測定した。実際の管用超音波流量計のトランスデューサは比較的近距离で使用されるため、音圧の測定距離は 29 cm から 107 cm までとした。トランスデューサには、直径 8 mm ϕ の PZT 振動子を使用した。その受信電圧の周波数特性を Fig. 3 に示す。小型の水槽で測定したため、多少凹凸のある特性を示したが、トランスデューサ単体の尖鋭度は比較的低く、約 50 であった。

音場の安定化の実験では、諸量の変化による影響を押さえるために、室温と音波の伝搬媒質の温度をほぼ同一にした。トランスデューサへの気泡の付着に注意して、純音と FM 超音波を交互に送信し、受信電圧(音圧)を測定した。Fig. 4 に受信電圧の測定結果の例を示す。FM 超音波と純音のデータを

Fig. 3 Transducer-transducer frequency response.

Fig. 4 Examples of received voltage in the pipe.

Table 1 Mean standing wave ratios of pure tone and FM ultrasonics.

Accumulation Name	Quantity of Data	Wave	Mod. Index	Mean Standing Wave Ratio
Data A	8 times	Pure	—	5.75
	8 times	FM	24	4.17
Data B	8 times	Pure	—	4.93
	8 times	FM	16	4.13
Data C	8 times	Pure	—	4.63
	8 times	FM	8	4.15

Medium: Water, Diameter of pipe: 50 mm ϕ , Distance (L): 0.29~1.07 m, Carrier freq.: 183.0 kHz, Mod. freq.: 0.9946 kHz, Transducer: PZT 8 mm ϕ , Applied voltage of transducer: 10.97 dBV, Medium temp.: about 16.5 °C

比較すると、音圧の振幅の変化は長い距離での変化、短い距離での変化とともに FM 超音波のほうが少ない傾向が見られた。また、FM 超音波を用いて音圧を繰返し測定したが、同様な波形となり、純音と比較して FM 超音波が不安定になるというデータは得られなかった。このように音圧は複雑な波形となっているが、測定管全体の共鳴現象について考察するため、長い距離での振幅変化に着目し、音響工学や伝送回路の場合と同様に定在波比を計算することにした⁸⁾。その結果を **Table 1** に示す。諸変化の抑圧のために短時間で測定が終了するように、純音と FM 超音波について 8 組の受信電圧を測定した。定在波比は 1 データにつき 3 個所の平均値を求め、8 組の平均値を算出した。その結果、全データの定在波比は 5 前後となったが、純音と比較して、FM 超音波では定在波比が約 10~30% 程度減少した。定在波成分の減少は、温度などの影響による媒質の諸変化による測定データへの影響の低減を意味しており、測定データの安定性、再現性が向上する。言い換えれば、特定個所からの強い反射波が拡散し、平均化されるため、受信信号に含まれる不安定な反射波の成分が低減し、安定な測定データの取得が可能になることを意味している。結果として測定精度の向上が予想できる。このように、FM 超音波による測定音場の安定化の効果が実験的に確認できた。

4. 提案した流量計に関する実験

本論文提案の FM 成分消去法を用いた超音波流量計の具体的な構成例とその測定精度の検証に関する諸実験の結果について述べる。

4.1 実験装置の概要

実験に用いたトランスデューサの配置図を **Fig. 5** に示す。超音波の伝搬距離が長くなるように 1 回反射の伝搬経路とした。位相差法を用いた流量計では、使用する超音波の周波数が高いほど、流速に対する感度は高くなる。そのために、FM 超音波の搬送波信号の周波数を約 183 kHz [文献 3) では 21.3 kHz] として、測定精度の向上を期した。トランスデューサは、流体中の超音波信号のみが受信できるように、防振ゴム

Fig. 5 Arrangement of transducers. **Fig. 6** Experimental system for the proposed FM ultrasonic flowmeter.

で測定管と音響的に絶縁し、3 章の音場の実験に用いた PZT 振動子と同じものを使用した。流体は水として諸実験を実施した。

Fig. 6 に提案した FM 超音波流量計の実験装置のブロック図を示す。1 組切替方式で流体温度の変化を補正するために、超音波の伝搬方向を 1 秒間隔で切替えて送信し、上流と下流方向の受信信号を得た。ただし、急速に温度変化しない流体を想定して、切替え速度を設定した。具体的には、制御回路と送・受信切替えスイッチ A, B でトランスデューサ A とトランスデューサ B の送信、受信を切替えた。諸データの比較のために、測定データはパソコンによって記録し、計算処理を実施した。比較に用いた流量計は、誤差 $\pm 0.25\%$ のタービンメータを使用した。その瞬時流量と流体温度 (参考データ) は、GP-IB インターフェースを介してパソコンへ入力した。また、上流および下流方向の位相差のデータや測定方向識別信号もパソコンへ入力した。FM 変調器、FM 検波器は汎用の PLL-IC を用いて製作した。位相計には、高い位相の分解能が得られる点から、インピーダンスアナライザを転用した。その分解能は 0.01 度である。受信信号が FM 信号であるため、プリアンプ A, B の共振部の尖鋭度が大きくならないように配慮した。具体的には、-3 dB の帯域幅を約 70 kHz とした。同様な理由から、トランスデューサには尖鋭度を低くするためにダンピング抵抗を取り付けた。移相器 A, B は受信信号の初期位相角の値を調整するためのものである。FM 成分消去回路は、2 章の **Fig. 1** に詳細なブロック図を示してあるので、説明は略する。装置全体として、位相の安定

度が高くなるように配慮して、製作した。

4.2 実験結果・考察

FM 成分消去処理の効果を検証するために、FM 成分消去回路の特性を測定した。Fig. 7 にその結果を示す。消去処理後の FM 成分量は、処理前に比べて広い変調指数の範囲で 40 dB 前後の減衰量になっており、位相値を検出するには十分な消去性能が得られた〔文献 3〕の消去法では 33 dB 程度〕。この消去回路の応答速度は、以下の実流試験の位相データが十分に安定して得られていることから、問題はないと考えられる。

提案した FM 超音波流量計の瞬時流速の測定結果の例が Fig. 8 である。同図は、瞬時流速が 0.5 m/s と 1.4 m/s 付近において、タービンメータを基準流量計として、これと FM 超音波流量計の瞬時流速値を比較したものである。図のスケールではその差が表示できないほど、両者は良く一致して

いた。しかし流速値が大きく変化しているときには、差異が生じるようである。これは、FM 超音波流量計とタービンメータとの応答速度の違いなどが主な要因と考えられる。

Table 2 から Table 5 に、タービンメータを基準流量計としたときの FM 超音波流量計の流量測定誤差を示す。Table 2 は瞬時流速約 0.5 m/s の場合、Table 3 は約 1.0 m/s の場合、Table 4 は約 1.4 m/s の場合、Table 5 は約 1.9 m/s の場合の結果である。Q_{0.5a} (瞬時流量を集積した流量名) などの瞬時流量のサンプリング数 (データ数) はタービンメータ、FM 超音波流量計ともに 198 個である。これらの流量データから FM 超音波流量計の体積流量誤差を算出した。Table 2 の最大誤差は±1% を越え、低流速で誤差が大きくなる傾向を示したが、これより大きい流速範囲では、最大誤差が±0.7% 以下となった。実験に使用した水流実験装置は、約 0.3 m³ 程度のかなり小さなタンク容量であり、短時間の流量比較にもかかわらず、十分小さな測定誤差となった。超音波流量計としては、十分な性能が得られたものと考えられる。

Fig. 9 に、流体温度を変化させたときの FM 超音波流量計

Carrier freq. : 183.0kHz, Mod. freq. : 0.9946kHz, Input voltage: -4.12 dBV

Fig. 7 Effect of the FM component elimination circuit.

Measuring conditions : Same as Table 2,3,4,5.

Fig. 8 Comparison of instantaneous flow velocity.^a

^a Reference flowmeter : Turbine meter.

Table 2 Flow rate errors of the FM ultrasonic flowmeter.^a
Accumulation Q_{0.5}: Mean flow velocity ≒ 0.5 m/s

Accumulation Name	Sampling Numbers	Errors [%]
Q _{0.5a}	198 (No. 1~No. 198)	-1.36
Q _{0.5b}	198 (No. 199~No. 396)	-0.92
Q _{0.5c}	198 (No. 397~No. 594)	+0.13
Q _{0.5d}	198 (No. 595~No. 792)	+0.79
Q _{0.5e}	198 (No. 793~No. 990)	+1.37

^a Reference flowmeter : Turbine meter

Table 3 Flow rate errors of the FM ultrasonic flowmeter.^a
Accumulation Q_{1.0}: Mean flow velocity ≒ 1.0 m/s

Accumulation Name	Sampling Numbers	Errors [%]
Q _{1.0a}	198 (No. 1~No. 198)	-0.50
Q _{1.0b}	198 (No. 199~No. 396)	-0.14
Q _{1.0c}	198 (No. 397~No. 594)	+0.43
Q _{1.0d}	198 (No. 595~No. 792)	+0.13
Q _{1.0e}	198 (No. 793~No. 990)	+0.01

^a Reference flowmeter : Turbine meter

Table 4 Flow rate errors of the FM ultrasonic flowmeter.^a
Accumulation Q_{1.4}: Mean flow velocity ≒ 1.4 m/s

Accumulation Name	Sampling Numbers	Errors [%]
Q _{1.4a}	198 (No. 1~No. 198)	-0.64
Q _{1.4b}	198 (No. 199~No. 396)	-0.23
Q _{1.4c}	198 (No. 397~No. 594)	+0.11
Q _{1.4d}	198 (No. 595~No. 792)	+0.54
Q _{1.4e}	198 (No. 793~No. 990)	+0.21

^a Reference flowmeter : Turbine meter

Table 5 Flow rate errors of the FM ultrasonic flowmeter.^a
Accumulation $Q_{1.9}$: Mean flow velocity ≈ 1.9 m/s

Accumulation Name	Sampling Numbers	Errors [%]
$Q_{1.9a}$	198 (No. 1~No. 198)	-0.61
$Q_{1.9b}$	198 (No. 199~No. 396)	-0.08
$Q_{1.9c}$	198 (No. 397~No. 594)	+0.34
$Q_{1.9d}$	198 (No. 595~No. 792)	+0.83
$Q_{1.9e}$	198 (No. 793~No. 990)	-0.49

^a Reference flowmeter: Turbine meter

Measuring conditions of Table 2~Table 5.

Medium: Water, Inside diameter of pipe: 50 mm ϕ , Numbers of reflection: 1 time, Emanating angle: 0.4363 rad, Carrier freq.: 183.0 kHz, Mod. freq.: 0.9946 kHz, Mod. index: 16.9, Applied voltage of vibrator: 13.89 dBV, Vibrator: PZT 8 mm ϕ

の誤差特性を示す。実験は、流体温度を高くして外気温度と温度差を作り、屋外のタンクから流すことによって、流体を冷却しながら Fig. 8 と同様な流量誤差の測定を実施した。最大の体積流量誤差は $\pm 3\%$ 弱であった。この実験では、流体温度を強制的かつ急速に冷却しているため、測定誤差が増大したものと考えられる。すなわち、実験装置では上流と下流の位相データを得る時間に1秒間の差がある。そのため、上流と下流の音速の値[(9)式と(10)式の C]が違うことになる。この流体温度の差による誤差の増大分を、測定中の流体温度のデータなどから検討した結果、約1%になることがわかった。また、Table 2~5 に比べて Fig. 9 の測定データのサンプリング数が少ないことも、誤差が増大した主要因と考えられる。

本論文の諸実験では、トランスデューサとして PZT 振動子を使用した。しかし、高分子圧電膜(PVDF など)系の音響トランスデューサを用いれば、材料としての尖鋭度は5程度であるために、かなり広く周波数を変化できる。そのため、更に大きな変調指数の FM 超音波を用いた流量計の可能性も考えられる。実際にこの種の振動子として、音響ホログラフィ用の広い周波数帯域を有するトランスデューサが開発されたという報告例もある⁹⁾。

上記のように、再変調による FM 成分消去法を FM 超音波流量計に導入することなどの改良によって、測定データが十分安定に得られた。結果として、文献3)に比べて約8倍の感度を有し、実用的な精度の FM 方式の超音波流量計が開発できた。

5. おわりに

本論文では、FM 超音波の受信信号に含まれる FM 成分を消去する新しい方法を提案し、その中心周波数成分の位相から流量を得る FM 超音波流量計の測定原理、構成例、諸性能の検証に関する実験結果などについて報告した。更に、FM 超音波による音場の安定化の効果を検証する実験などについて

Reference flowmeter: Turbine meter

Outdoor air temperature: 12.5°C, Indoor air temperature: 25.5°C, Mod. index: 13.5, Mean flow velocity: about 0.72m/s, Sampling numbers: 79, Other measuring conditions: Same as Table 2~5.

Fig. 9 Magnitude of the flow rate errors of FM ultrasonic flowmeter to the fluid temperature change.

も報告した。提案した測定法は、中心周波数成分から流量を検出しているため、FM 超音波の変調信号成分から流量を検出する方法に比べて、かなり高感度な流量計が得られた。FM 超音波を使用した目的は、多重反射信号を完全に除去するためではなく、FM 超音波によって受信信号の定在波成分を低減し、測定部の音場を安定化して流量を検出するためである。本論文に述べた再変調による FM 成分消去法は、簡単な電子回路で、変調指数の値に制限がなく、受信変調信号成分の波形が歪んでいても消去できるなどの特長を有している。その消去性能は 40 dB 前後の減衰量となり、位相値を検出するには十分な性能が得られた。音場の安定化の効果を検証する実験では、FM 超音波によって定在波比が 10~30%程度減少することが確認できた。同時に、FM 超音波の使用によって、音圧の不安定性が発生しないことも確認できた。流量測定精度に関する実験では、タービンメータを基準として、これと比較した FM 超音波流量計の最大測定誤差が $\pm 1.4\%$ 以下であった。小流量での比較にもかかわらず、良好な値が得られた。更に、流体温度の変化に対する流量測定精度の実験などから、本測定法を用いた超音波流量計が、十分に実用的な性能を有していることが確認できた。本論文で報告した FM 成分消去の原理は、位相差法のみでなく、時間差法などの連続波を用いた FM 超音波流量計に適用可能であろう。

参 考 文 献

- 1) D. I. Plaut and J. G. Webster: Ultrasonic Measurement of Respiratory Flow, IEEE Trans., **BME-27**-10, 549/558 (1980)
- 2) D. W. Franklin, W. S. Kemper and K. E. Pierson: Frequency Modulated Ultrasound Transit Time Technique for Measurement of Fluid Velocity, Proc. Int. Conf. Med. Biol. Eng., **10**-12 (1969)
- 3) 谷澤, 廣瀬, 福澤: FM 成分消去処理を施した高感度超音波流速測定法, 電子情報通信学会論文誌 A, **J74-A**-12, 1695/1704 (1991)
- 4) 重井: アナログ通信工学, 77/92, 昭晃堂 (1987)
- 5) 川田, 小宮, 山崎: 流量計測ハンドブック, 6 章, 日刊工業新聞社 (1979)
- 6) 伊藤: 音響工学原論, 623/624, コロナ社 (1975)
- 7) 岡原, 中島, 朝倉: オーディオハンドブック, 45/47, オーム社 (1978)
- 8) 神谷, 辻: 基礎伝送回路, 71/73, コロナ社 (1978)
- 9) 田村, 石原, 伊藤, 石井, 久本, 湯浅: Walsh 関数変調波を用いた 3 次元音響ホログラフィ撮像, 計測自動制御学会論文集, **31**-7, 824/833 (1995)

[著 者 紹 介]

谷 澤 茂 (正会員)

1972 年中央大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了, 博士(工学)。現在, 日本工業大学電気電子工学科教授。超音波計測, 音響工学に関する研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会, 日本音響学会などの会員。

廣 瀬 治 男

1963 年慶応義塾大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了(工学博士)。現在, 日本工業大学電気電子工学科教授, 教務部長。半導体および計測に関する研究に従事。IEEE, 電気学会, 電子情報通信学会, 応用物理学会などの会員。

吉 久 信 幸

1945 年東京帝国大学第一工学部電気工学科卒業(工学博士)。中央大学名誉教授。元中央大学理工学部電気電子工学科教授。音響工学に関する研究に従事。日本音響学会の会員。