可変オリフィス流量計の開発

猪瀬 善 郊*・山田 長 政**

古瀬 昭 男**・黒須 茂*

Development of Dynamic Flowmeter

Yoshihiro INOSE*, Nagamasa YAMADA**,
Akio FURUSE** and Shigeru KUROSU*

This paper describes experimental studies about an entirely new device for measuring flowrate (called Dynamic Flowmeter) which provides precise direct digital output proportional to the flowrate. A cylindrically winding strip supported on a frame is installed on an orifice in the flow. The differential pressure in the orifice acting on the strip causes a deflection. Thus, when the deflection can be measured accurately, this flowmeter operates as precision linear instrument with high reproducibility. The principal characteristics of the flowmeter are analyzed by using a simplified flow model. To evaluate the performance, experiments for air and within the range of the flowrate ($0 \sim 8.3 \times 10^{-4}$ [m³/s]) are conducted. The flowmeter constructed with suitable parameters is promising for practical applications.

Key Words: dynamic flowmeter, flow characteristics, orifice

1. はじめに

微小流量の測定分野では、従来から浮子面積式流量計が広く利用されてきたが、流量特性を支配する因子、動作条件の変化に対する補正などに関して解決されたとはいえない^{1)~4)}。筆者らはこの浮子面積式流量計とは原理、構造の異なる帯状のダイアフラムを用いた可変オリフィス流量計を開発し、その流量特性を理論的、実験的に検証した⁵⁾。しかし、この流量計は本質的に非線形特性であり、センサとして使用するには電氣的なリニアライザを必要とした。また、片持ち梁構造のため受圧板の材質の経時的な変化を受け易く、

し、一対の検出コイルにより差動的に検出され、流量は偏位量に対して線形性を有する特長をもっている。

本報告では、可変オリフィス流量計の特性を理論的に求め、作動流体として空気を取り、実験的にその有効性を検証する。

2. 構造、原理および特長

Fig. 1 に示すように、流路に対して直交する円柱状の支持体①に、磁性をもつばね材によって円筒状に折り曲げられた可動体②が内周面を線接触させて支持されている。可動体②の外周面に円柱状の固定体③が接近して支持され、流体は可動体②と固定体③との間隙を流れ、流路の差圧に応じて可動体②が偏位し、流路断面積が変化する。

可動体の偏位は流路に沿って配置された一対の検出コイル④により、ブリッジ回路により差動的に電圧信号として出力され、直線性をあげている。この可変オリフィス流量計も通常の差圧式流量計と同様にあらかじめ密度のわかっている流体に対してのみ測定可能である。

開発した可変オリフィス流量計には、つぎのような特長がある。

- (1) 直線性がよい。フルスケール (8.3×10^{-4} [m³/s]) の3%以下。
- (2) レンジアビリティ (測定可能最大流量/同最小流量) が広い。20/1 であり、フルスケールに対して極微小流量 5×10^{-5} [m³/s] 以下は信用できないことになる。
- (3) 再現性がよい。零からフルスケールまで3回実測した結果、真値とのずれの最大値が0.55%以下であり、面積式流量計に比べて数段高精度である。
- (4) 温度特性がよい。10℃の温度変化に対して、フルスケールで真値とのずれが0.125%以下である。

Fig. 1 Schematic of dynamic flowmeter

零点を安定化させることに難点があった。

そこで、これらの問題点を解決するために、従来からの片持ち梁構造の受圧板の代わりに、帯板を円筒状に巻いたラップ型の可動体に改良した。可動体の偏位は流路の差圧に比例

* 小山工業高等専門学校 小山市中久喜 771

** コスモ計器 (株) 八王子市石川町 2974

* Oyama National College of Technology, Oyama

** Cosmo Instruments Co., Ltd., Hachioji

(Received July 18, 1996)

(Revised March 31, 1997)

Fig. 2 Simplified flow model

3. 解 析

3.1 流量特性

さて、可変オリフィス流量計の理論流量を導くことにしよう。本文で使われるおもな記号はつぎのとおりである。

- p_1, p_2 : 各領域における圧力 [Pa]
- v_1, v_2 : 各領域における流速 [m/s]
- A_1, A_2 : 各領域における流路断面積 [m²]
- ρ : 作動流体の密度 [kg/m³]
- Δp : オリフィス部の差圧 ($= p_1 - p_2$)
- Q : 流量 [m³/s]
- k : 可動体の弾性係数 [N/m]
- δ : 可動体の作動時の偏位量 [m]
- l : 可動体の流路と直交する方向の長さ (全幅) [m]

解析に先立って、つぎのように仮定する。

- (1) 作動流体は非圧縮性と考え、密度の変化は考えない。
- (2) 室内温度での使用を前提とし、温度変化による影響は無視する。
- (3) 可動体は柔らかいばねと考え、流路方向にも鉛直方向にも自在にたわむものとする。

まず、非圧縮性流体の定常流れとして、オリフィス部の差圧 Δp と流速 v_1, v_2 の変化に対して、運動量の法則を適用すると、つぎようになる。

$$A_1 \Delta p dt = (\rho_2 A_2 v_2 dt) v_2 - (\rho_1 A_1 v_1 dt) v_1 \quad (1)$$

ここに、流速について連続の式

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (2)$$

を適用すると、(1) 式はつぎようになる。

$$A_1 \Delta p = \rho Q (v_2 - v_1) \quad (3)$$

オリフィス部は微小な間隙であるから流速は大きい。つまり、 $v_2 \gg v_1$ であるから、(3) 式はつぎようになる。

$$A_1 \Delta p = \rho Q v_2 \quad (4)$$

これより、 v_2 が一定ならば差圧 Δp は流量 Q に比例することになる。このことは、 v_2 が一定になるように可動体が偏位することを意味する。可動体の偏位量 δ は差圧 Δp による力に比例するから、力平衡より

$$A_1 \Delta p = k \delta \quad (5)$$

オリフィスの開口部の面積 $A_2 = l\delta$ であるから、

$$A_2 = (A_1 l / k) \Delta p \quad (6)$$

したがって、オリフィス部の流速 v_2 はつぎようになる。

$$v_2 = (Q / A_2) = (k / A_1 l \Delta p) Q \quad (7)$$

(7) 式を (4) 式に代入すると

$$A_1 \Delta p = (\rho k / A_1 l) Q^2 / \Delta p \quad (8)$$

となり、結局体積流量 Q は

$$Q = A_1 \sqrt{l / \rho k \Delta p} \quad (9)$$

となり、差圧 Δp に比例することがわかる。差圧 Δp が一定のとき、 Q は ρ の $1/2$ 乗に反比例することがわかる。差圧 Δp によって偏位する可動体の偏位量を精度よく測定することが重要となる。

3.2 差動検出回路

差圧によって偏位する可動体の支持点を挟んで、対称に一对のインダクタンスを利用した偏位検出用センサを配置し、可動体の偏位量を差動的に検出する。そのブリッジ回路を Fig. 3 に示す。

偏位検出用センサはコイル L および抵抗 r からなるブリッジ回路によって構成される。コイルのインダクタンスは可動体の偏位量 δ に応じて増加する方向に $L + \Delta L_1$ 、減少する方向に $L - \Delta L_2$ と距離に反比例した特性を持って互いに差動的に変化する。出力端子には電流は流れないものと考え、端子間の電圧 ΔE を求めると、

ループ I について：

$$V \frac{\{r + j\omega(L + \Delta L_1)\}}{\{2r + j\omega(2L + \Delta L_1 - \Delta L_2)\}} - \frac{V}{2} = \Delta E \quad (10)$$

ループ II について：

$$V \frac{\{r + j\omega(L - \Delta L_2)\}}{\{2r + j\omega(2L + \Delta L_1 - \Delta L_2)\}} - \frac{V}{2} = -\Delta E \quad (11)$$

となる。(10) 式から (11) 式を引くと、出力電圧 ΔE は

$$\Delta E = \frac{V j\omega \Delta L}{2\{2r + j\omega(2L + \Delta L_1 - \Delta L_2)\}} \quad (12)$$

ここに、 $\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2$ である。分母において $\Delta L_1 - \Delta L_2$ は $2L$ に比べて微小であるから無視できる。出力電圧 ΔE はインダクタンス変化 ΔL に比例して変化する。したがって、出力電圧 ΔE は、可動体の偏位量 δ に対して線形特性となる。

Fig. 3 Bridge circuit

4. 実験

4.1 実験装置および方法

作動流体に乾燥空気を用いて、Fig. 4 の実験装置により流量特性を求める。ライン圧は1の圧力レギュレータと弁により0kPaに設定し、流量調整弁で制御された基準流量は3の層流量計で測定され、2は可変オリフィス流量計であり、前後の差圧 Δp が差圧センサで測定される。可動体の偏位は検出コイルにより電圧信号として測定する。可動体の板厚は 0.07×10^{-3} m、材質はステンレス磁性体(631)幅 30×10^{-3} mである。固定体の材質は真ちゅうであり、可動体との間隙は 0.1×10^{-3} m以下である。

4.2 実験結果

作動流体として乾燥空気を用いて、差圧 Δp 、出力電圧 ΔE に対する実流量を測定した結果をFig. 5 (a) (b)に示す。(a)は差圧 Δp に対する流量特性であり、(b)は出力電圧 ΔE に対する流量特性であり、いずれの場合にも線形関係を示している。つぎに、直線性からのずれとフルスケールとの比を誤差として、差圧 Δp に対する誤差、出力電圧 ΔE に対する誤差を示したのがFig. 6 (a) (b)である。(a)より微小流量に対して誤差が大きいのは、差圧 Δp が発生しにくい状況や不感帯の影響も考えられ、可動体と固定体との間隙の複雑な力学的挙動を示している。 $5 \times 10^{-5} \sim 8.3 \times 10^{-4}$ [m³/s]の範囲内では3%以下の直線性が保証されている。

Fig. 4 Experimental apparatus

Fig. 5 Flow characteristics

Fig. 6 Effect of Δp and ΔE on errors

5. おわりに

この可変オリフィス流量計は、低流量域をねらった小形構造をもつ流量計の開発過程において、試行錯誤の結果生まれたものである。単純な片持ち梁からなる受圧板をもつ従来の可変オリフィス流量計の絞り機構を柔らかい円筒状の可動体に置き換えることにより、流量と差圧の線形性が実現できるという優れた特長をもっている。可動体と固定体の間隙が小さいと、流量の増加に伴って渦の発生により振動を起こすことがある。このとき固定体も柔らかい材質により円筒状の補正可動体を構成し、振動の防止とともに不感帯の発生が回避され、測定出力が安定し、高精度の流量計が実現できる。

また、この流量計は圧力損失が少ない上に、取り外して洗浄するのが容易であり、それによって特性が変化することはない。筆者らは医療用の呼吸流量計への用途の可能性を期待している。本報告では、新しく提案した測定原理に基づき、可変オリフィス流量計を試作し、流量計としての基本的特性を検証し、本方式を活用する際の有用な資料を与えた。

参考文献

- 1) 香川, 清水: 動作圧の変化が空気用面積流量計の特性に及ぼす影響, 計測自動制御学会論文集, **23**-10,1003/1008 (1987)
- 2) 牧, 森: 浮子面積式流量計の理論的研究, 機械学会論文集, **36**-283,415/429 (1970)
- 3) 清水, 香川: 球形浮子面積式流量計の特性及び動作条件変化の特性, 計測自動制御学会論文集, **27**-4,381/385 (1991)
- 4) 牧: 球フロートを用いた浮子式面積流量計の一般的流量特性, 流体工学, **13**-8,460/464 (1977)
- 5) 猪瀬ほか: 可変オリフィス流量計の流量特性, 計測と制御, **34**-8,671/675 (1995)