

後流差圧検出ピトー管流量計の実用化

温井 一光*, 川嶋 健嗣**, 香川 利春**, 小宮 勤一***

Practical use of wake differential pressure detection pitot tube flow meter

Kazumitsu NUKUI*, Kenji KAWASHIMA**, Toshiharu KAGAWA**, Kinichi KOMIYA**

Abstract: The flow meter with different measuring method is used for the flowing quantity measurement of the gas. We started the research of the wake differential pressure detection pitot tube flow meter for the gas. This flow meter is fluid pressure 1MPa or less of the gas and uses air, oxygen, and carbon dioxide, etc. Because the feature of the flow meter arranges the wake differential pressure detection hole of the pitot tube in the wake, it is a strong structure in dust and mist, etc, in the fluid. The measurement is wide-ranging from the laminar flow to turbulent flow with 20:1 or more. The detection of the differential pressure uses the micro differential pressure sensor. In this research, an experimental flow meter examined both stationary and non-stationary flow rate characteristics. As a result, the method of designing the wake differential pressure detection pitot tube flow meter was analyzed and the prospect to practical use was applied.

Keyword: Wake differential pressure detection pitot tube flow meter, stationary and non-stationary flow, Flow meter, Flow rate measurement.

1 はじめに

空気、窒素など各種流体の流量測定において、様々な測定原理を用いた流量計が実用化されており、産業界のプラント、ビル空調、半導体産業等で広く使用されている[1]。また、次世代技術の燃料電池、省エネ監視、環境分析等の流量測定の分野への適用を考えると、安定した条件下の定常流のみならず、非定常な脈動やミストの混合状態の流量を正確に測定する流量計が必要となる。

さらに、少量、多品種をバッチ処理する製造装置内で使用される流量計には小型高速応答、測定範囲の広い低価格な製品が求められている。

これらの要求に答えるために、著者らはピトー管と差圧測定に最近のマイクロ微差圧センサを組み合わせ、ピトー管流量計を提案している[2]。一般的にピトー管流量計は煙道等の大口径配管、ダクトにおける廃ガス量の測定、低圧気体用の流量等の測定に用いられている。また、ピトー管は飛行物体の流速測定や風洞内の流速測定に多く使用されている[3]が、著者らが提案している流量計は小口径のものであり、また差圧の検出孔に特徴のある新しいものである。

本研究では、提案した後流差圧検出ピトー管流量計の設計指針を明らかにし、実用化を目指すことを目的とする。はじめに、提案した流量計の設計を行い、管径、ピトー管径等の寸法の異なる8種類の流量計を試作した。次いで、これらの試作品の流量と差圧の関係を測定流体

が空気の場合について実測し、加圧下の流量測定も行った。

また、非定常状態の流量特性は、研究室で所有している等温化圧力容器を用いた非定常流量発生器[5]を用いて、周波数を10Hz、測定ラインの圧力0.3MPa(G)まで変化させ測定を行った。さらに、実用化に向けて製作した同一形状の流量計5個について器差を調べたので、それらの結果を報告する。

主な記号

a	ピトー管投影断面積	[mm ²]
A	管路断面積	[mm ²]
d	圧力検出孔の内径	[mm]
D	管路内径	[mm]
D_p	ピトー管の外径	[mm]
E	器差	[%]
K_p	ピトー管係数	
Q	体積流量	[Nl/min]
Qu	非定常流量	[Nl/min]
ΔP	差圧	[Pa]
P_a	大気圧	[Pa]
P_m	測定流体の圧力	[Pa]
ρ	気体密度	[kg/m ³]
v	流速	[m/s]
R_{ed}	レイノルズ数の計算の d は D_p を使用する	
f	周波数	[Hz]
P_s	ピトー管の静圧	[Pa]
P_t	ピトー管の後流圧	[Pa]

2 後流差圧検出ピトー管流量計

2.1 流量計の構造

提案した流量計の構造図を Fig 1 に示す。測定管路の

*東京工業大学大学院総合理工学研究科
精密機械システム専攻 (日本アプライドフロー株)

**東京工業大学精密工学研究所
(〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)

***工学院大学

*Tokyo Institute of Technology (Japan applied-flow Co. Ltd)

**Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology

(Received June 9 2004)

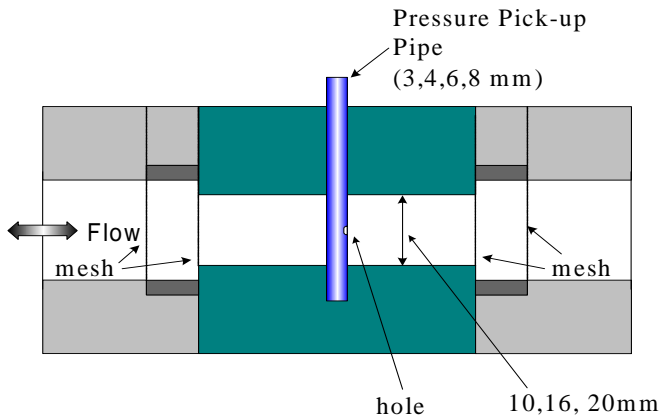


Fig 1 Structure of Pitot type flow meter

両側出入り口に流体の流れを整流するためにメッシュを配置し、中央に後流差圧(以下、後流圧という)測定用のピトー管を挿入している。

この流量計の特徴をまとめると以下ようになる。

まず、配管接続口径より管路口径を小口径に設計することによって、流体の流れを縮流し、流速分布を均一にする効果を期待する。この結果、管路中心部に配置したピトー管の中心に加工した後流圧検出孔において、差圧を安定して測定することが可能である。

また、流体の整流効果を試験するため、ピトー管を中心にして、両側に5mm間隔に整流用の金網80メッシュを2枚取り付け、双方向の流れの均一化を図った。

さらに、通常のピトー管流量計ではピトー管の構造はFig.2のaに示すように、総圧検出孔が流れに対して上流方向に向いている。しかし、著者らが提案した流量計で使用するピトー管はFig.2のbに示すように後流圧検出孔が流れに対して後流方向に配置されている。この結果、後流圧は吸引方向の負圧になることが明らかになっている[4]。このため、通常の左方向からの流れてくる流体中に存在するミスト、ダストによりピトー管の後流圧検出孔が塞がれることを防ぐことが可能である。また、流量測定時の差圧が安定することもわかっている。

2.2 試作品の仕様

この流量計を設計するために、決定すべき重要なパラメータは管路内径 D 、ピトー管外径 D_p および後流圧検出孔の内径 d である。まず、使用するマイクロ微差圧センサは分解能、動特性などを考慮して、測定可能範囲1000Paのものを選定した。測定可能な最大流速は流れの中に置かれた円柱で発生する抵抗の式から与えられる。

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

よって、測定流体が空気である場合、測定可能な最大流速 v が40m/sであると規定される。

また、小型化を目標としていることから管路内径は10mm,16mm,20mmの3種類を用意した。流量 Q と流速 v の関係は次式で与えられる。

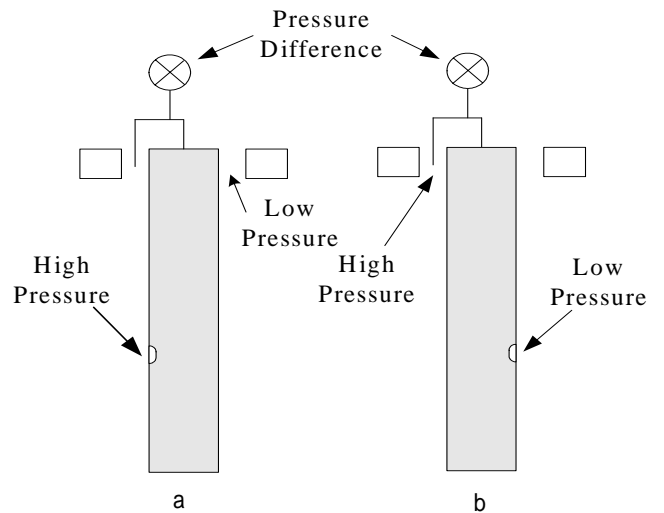


Fig 2 Pitot tube sensor

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 v = \frac{\pi}{4} D^2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2)$$

しかし、提案する流量計は後流圧の検出孔が後流にあるために、(2)式を完全には満足しない。そこで、差圧と流量の関係はピトー管係数 K_p を補正係数とした次式で与えられることを確認している。

$$Q = K_p \frac{\pi}{4} D^2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (3)$$

ピトー管係数の値は0.7程度の値となる[4]。そこで、管路内径10mmの場合の最大測定可能流量は約200Nl/min、16mmの場合では約500Nl/minとなる。

次にピトー管は外径が大きくなるほど開口比 $(A-a)/A$ が小さくなり、差圧が大きくなることが予想される。そこで、外径が3mm,4mm,6mm,8mmの4種類を用意した。

最後にピトー管の後流圧検出孔の寸法決定であるが、検出孔付近で発生する流体の剥離現象が差圧測定に与える影響を確認するために、ピトー管径 D_p 4mmの中心部に後流圧検出孔の内径 d を1.2mm, 1.5mm, 1.8mm, 2.4mmの4種類に加工して差圧測定値のばらつきと安定性の予備実験を行った。その結果、孔の大きさによる影響はあまり見られなかったことから、加工の容易さ等を考慮して圧力検出孔の内径 d は1.8mmとした。

なお、流量計のレンジバリティは20:1、製造、較正のばらつきを考慮して、器差は5%を目標とする。

Table 1 Experiments description

Channel diameter	Pitot tube diameter (D_p)	Ratio $(A-a)/A$	Range of flow rate
20	3	0.810	500 Nl/min
	4	0.747	
	6	0.624	
	8	0.504	
16	3	0.763	500 Nl/min
	4	0.685	
	6	0.534	
10	4	0.504	200 Nl/min

以上の検討結果から試作した流量計は Table 1 に示す仕様の 8 種類である。また、静圧検出孔はピトー管の挿入部の全周囲に空間部を加工し検出する方法にした。さらに、整流効果を確保するための整流メッシュを容易に変更、追加できる構造にした。使用した差圧センサは流体圧力 1 MPa 以下の加圧下においても測定可能なシリコンダイアフラム式であり、分解能は 0.05% である。

試作した流量計を photo 1 に示す。比較のために単 3 の電池を横に置いた。この流量計は管路内径 D が 16mm であり、写真から明らかなように、非常にコンパクトな流量計である。また、表示部は瞬時流量と差圧表示を切換て表示できる。

3 流量計の特性

3.1 定常流量特性試験

流量計の定常流量試験装置を Fig 3 に示す。流量計の特性は試験流体として乾燥空気を使用する。この特性試験は流量調整弁の下流側に試作したピトー管流量計と不確かさ 0.5% の基準ガスメータを直列に接続することによって行った。大気圧下の試験は流量調整弁で流量を変更して、流量はガスメータを通過時の温度と大気圧の圧力を換算した基準流量とピトー管流量計で生じた差圧をシリコンダイアフラム式微小差圧センサにより測定した。

ライン圧力の変化させる試験方法は減圧弁をピトー管流量計の上流側に設置し、ピトー管流量計とガスメータの間に流量調整弁を設置する。この状態において、減圧弁を調整して試験配管のライン圧力を変化させながら流量と差圧の特性試験を大気圧下と同様に測定した。



Photo 1 Prototype flow meter

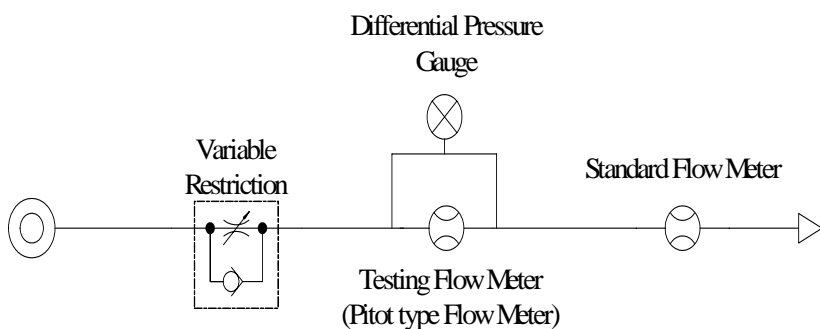


Fig 3 Experimental apparatus for steady flow measurement

加圧下での実験においては、測定流体の圧力はゲージ圧で 0.1MPa, 0.2MPa, 0.3MPa とした。このように配管圧力を変更することで、密度の異なる気体入手して測定する状態と等価の特性試験をすることにした。

3.1.1 実験結果

管路内径 16mm, ピトー管外径 6mm の場合に、ライン圧を変えて差圧と流量の関係を測定した結果を Fig 4 に示す。流体の圧力が上昇すると測定気体の密度が大きくなるため、差圧出力の値が小さくなる。その関係は理論的には次式で与えられる。

$$Q = K_p \frac{\pi}{4} D^2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho} \frac{P_a}{P_m}} \quad (4)$$

Fig 4 の結果において (4) 式を満たしていることを確認している。つまりライン圧が変化してもピトー管係数 K_p は一定の値を用いて流量が算出できることがわかった。

次にピトー管外径の影響を調べた。管路内径 16mm としたピトー管外径を 3mm, 4mm, 6mm とした場合の結果を Fig.5 に示す。ピトー管の外径を大きくすると管路断面積におけるピトー管の投影面積が大きくなり、流体の通過部分の開口比 $(A-a)/A$ が小さくなる。このため、流体の流速が加速されて流体の圧力損失が増加することから、ピトー管の外径を大きくすると、差圧は大きくなるのがわかる。

本流量計の Reynolds 数はピトー管の円柱における流量範囲の状態から 500 ~ 15000 となり、層流から乱流領域まで測定する範囲が広がっている。そのため、層流から乱流の遷移領域における流量と差圧の乱れをピトー管係数の変化として影響を調べることにした。その結果を Fig 6 示す

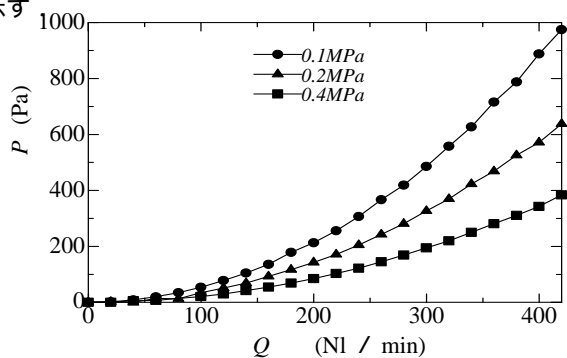


Fig 4 Experimental test results

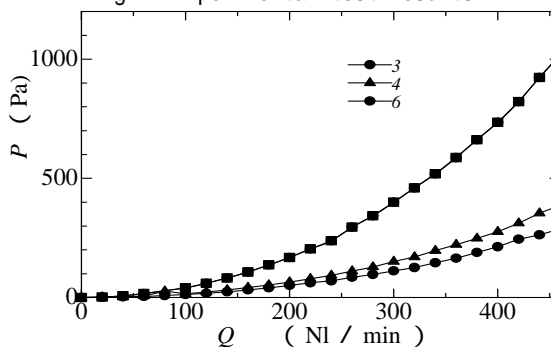


Fig 5 Experimental test results using 16mm pitot flow meter

Fig 6の結果より,レイノルズ数が500以上では試作品流量計3個のピトー管係数 K_p は各流量計の平均ピトー管係数に対して,ばらつきが $\pm 3\%$ 以下に収まっていることがわかる.本流量計が20:1のレンジバリティを満足していることが確認された.

さらに,今回のピトー管流量計に流体を逆流させた場合の総圧側の差圧特性を確認した.方法は逆流方向から0-400NI/minの流量を流して,流量と差圧特性試験を行った.その結果をFig 7に示す.

流量と差圧特性は後流圧と総圧は非対称になるが両方向の流れを測定できることが確認できた.

後流圧の流量特性と総圧の流量特性を比較すると約2倍になっている.

$$\text{総圧} = \text{後流圧} / \text{開口比} (1/0.534=1.87) \quad (5)$$

また,この特性を利用することにより,複数の排気ダクトを並列に接続しているダクト内で発生する閉塞現象の逆流状態の異常検知システムを構成できる.

3.2 非定常流量特性試験

本研究では,基準となる流量の発生において,非定常流量を安定して発生させることが必要となる.

そこで,共著者の川嶋らが提案した等温化压力容器を利用した非定常流量発生装置を用いて各種測定実験を行った.

発生装置の測定原理や有効性の確認等に関する詳細は参考文献[5]に譲るとして,以下に簡潔に説明をする.

まず,等温化压力容器は压力容器内に金属製綿を封入し,伝熱面積,熱容量を大きくすることで,容器内の気体の状態変化をほぼ等温にできる特徴をもっている.こ

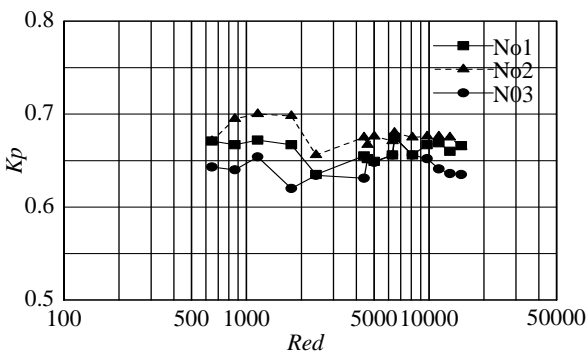


Fig 6 Flow rate coefficient

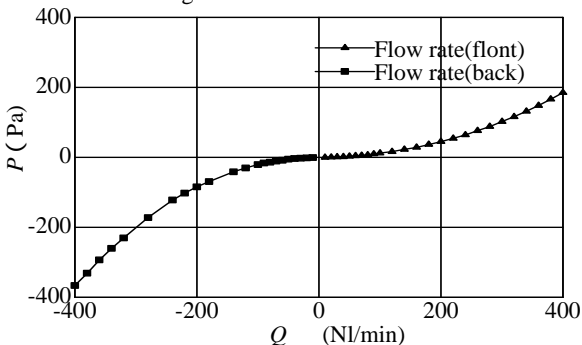


Fig 7 Experiment results flow meter (16mm-6)

の等温化压力容器を用いれば,容器から放出される気体の流量が圧力変化に比例することから,気体の瞬時流量が測定可能となる.

その実験装置の構成をFig 8に示す.圧縮空気の供給源より,減圧弁で0.5MPaに減圧して,等温化压力容器に圧縮空気を充填する.一方,等温化压力容器内の圧力は圧力センサの信号をコンピュータへ入力する.また,試験用の流量を発生させるために必要な開度信号をサーボ弁に出力する.等温化压力容器に充填後バルブを閉じ,プログラムを起動すると試験対象の流量計に対して,所定の非定常流量を発生させることが出来る

3.2.1 実験結果

非定常流量特性は測定差圧に,定常流特性のピトー管係数 K_p ,測定ライン圧力と流体温度の補正を計算して求めることにした.そのため,管路径10mm,ピトー管4mmのピトー管流量計の定常流特性試験を行った.Fig 9にその結果を示す.

次に,非定常流量特性試験を行った.試験条件は周波数1Hz,3Hz,10Hzの測定結果をFig 10,11,12に示す.横軸は時間,縦軸は流量を示し,実線は非定常流量発生装置の非定常流量 Q_u ,破線はピトー管流量計の測定流量 Q ,一点鎖線はピトー管流量計の差圧 P を示す.今回の周波数応答特性の圧力センサーは,研究室の非定常流量発生装置(50Hz)の実験用のものを使用した.

このFig 10,11,12の非定常流量 Q_u に対して,測定ライン圧が同一の測定流量 Q は誤差2%以下の流量を示している.また,位相はFig 10に示すように周波数1Hzにおいては Q_u と Q の位相の遅れなく追従していることが確認

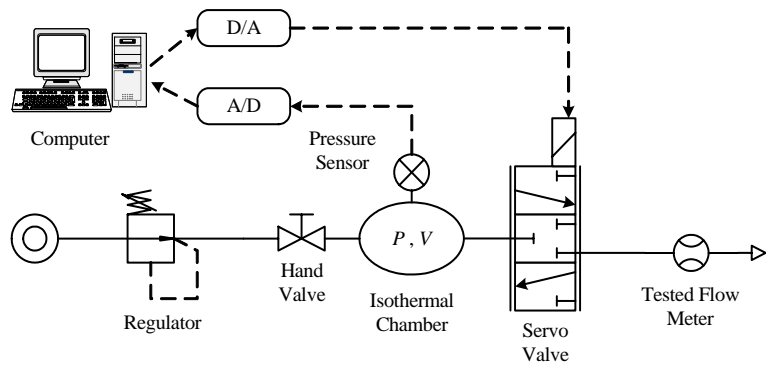


Fig 8 Experimental apparatus for unsteady flow measurement

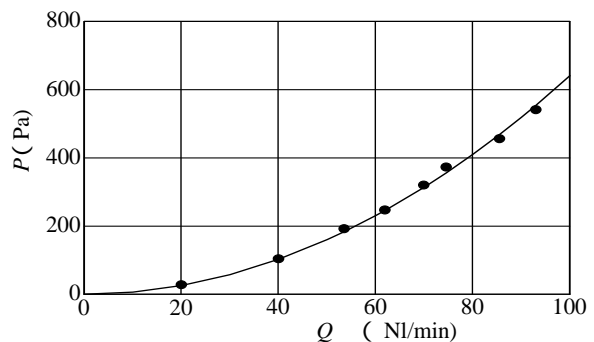


Fig 9 Experimental results flow meter (10mm)

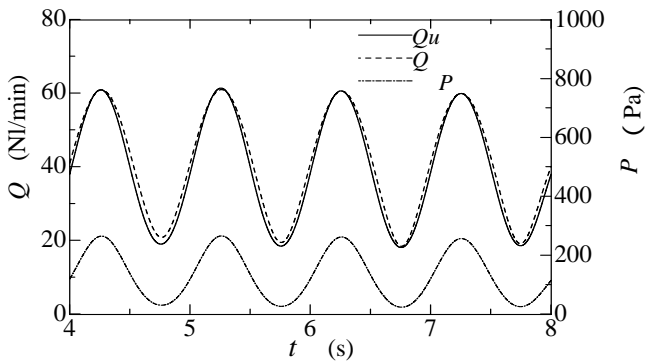


Fig 10 Experimental results of unsteady flow measurement (1Hz) 0.0MPa(G)

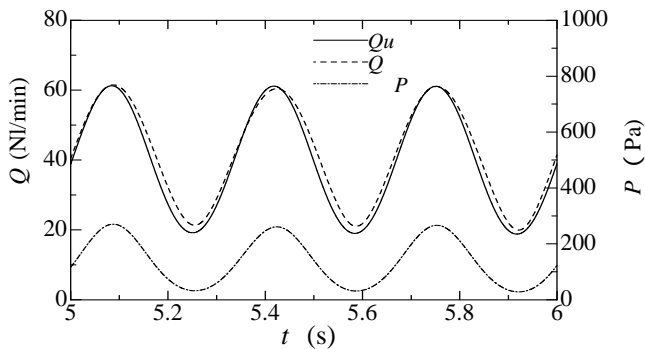


Fig 11 Experimental results of unsteady flow measurement (3Hz) 0.0MPa(G)

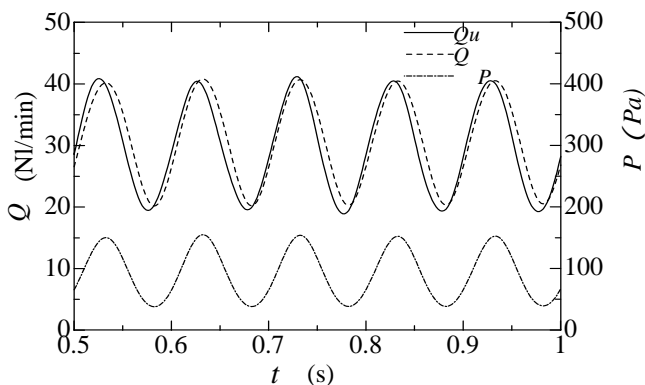


Fig 12 Experimental results of unsteady flow measurement (10Hz) 0.0MPa(G)

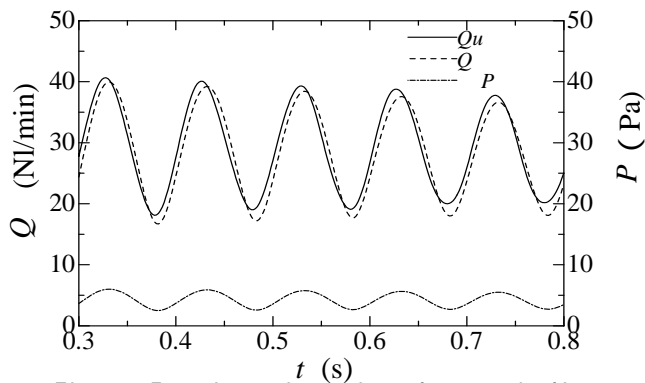


Fig 13 Experimental results of unsteady flow measurement (10Hz) 0.3MPa(G)

できた。Fig 11,12 に示すように周波数が 3 Hz 以上になると Q は Q_u よりも周波数が高くなるほど位相が遅れていることがわかる。

また、この Fig 12 と Fig 13 の 10Hz の結果を比較すると、ライン圧力の増加による流量測定値、位相の変化についてもあまり差は無かった。

後流差圧検出ピトー管流量計は非定常流量に対しても、10Hz 付近まで追従していることが確認できた。

次に円柱回りに発生するカルマン渦の周波数について、以下の検討を行った。

ピトー管の Reynolds 数と渦の発生周波数 [6] は G. I. Taylor が提案している (8) 式であらわせる

$$f = 0.198 \frac{v}{D_p} \left(1 - \frac{19.7}{Re} \right) \quad (8)$$

今回の流量計の設計条件は Reynolds 数 (Re) 550 ~ 1100 流速 v 4.2m/s (20NI/min) ~ 35m/s (200NI/min), ピトー管外形 D_p 4mm の設計条件から検討する。(8) 式に Re を代入するとピトー管後流で発生するカルマン渦周波数は大気圧状態で 200 ~ 1700Hz, 0.3MPa で 50 ~ 425Hz になる。

非定常流量試験時の周波数は 10Hz 以下であり、ピトー管後流で発生する渦の影響を受けずに安定して測定できていることが確認できた

3.3 実用化試作品の評価

実用化の設計に必要な基本的計算式、構造設計については今回の各種試験結果よりほぼ明らかとなった。

特に加圧試験 Fig 4 の結果から、測定気体のライン圧力 0.4MPa, 流量 500NI/min におけるピトー管の検出差圧 1000Pa を条件設計した。その結果、実用化試作品は管路外径 16mm, ピトー管外径 6mm が適していることがわかった。そこで、この仕様の流量計を 5 個試作し、その器差を測定した。その結果を Fig 14 に示す。

この結果より器差特性は測定レンジの 20:1 の範囲で $\pm 3%$ (of RD%) に入ることが確認できた。

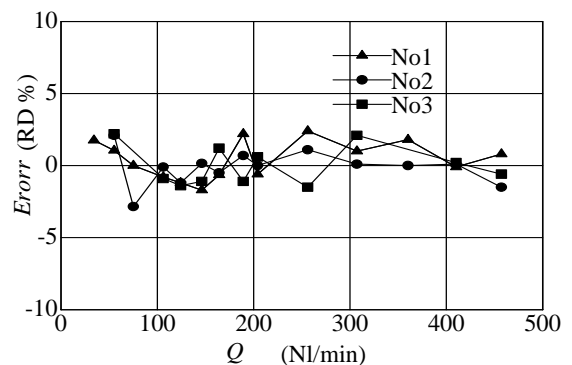


Fig 14 Result of instrumental error on prototype

4 まとめ

管路に円柱を挿入し、その後流に差圧検出孔を設けた後流差圧検出ピトー管流量計について、定常状態（静特性）、非定常状態（動特性）の流量特性を実験により確認を行った。以下にその結果をまとめる。

静特性評価

管径と外形の異なるピトー管を組合せ、流量と差圧特性からピトー管係数 K_p を求め、この係数を使用することにより、製品のばらつき、測定誤差を評価する方法がわかった。

また、同一管径におけるピトー管外形の変えることにより、生じる開口比率と K_p の関係について評価を行い、測定流量と発生差圧の関係を求める設計指針がわかった。

さらに、後流側検出により、測定範囲が広く差圧特性も安定することが判明し、従来の差圧式流量計とはことなる流量と差圧特性、測定レンジの拡大、測定差圧の安定性等も確認出来た。

動特性評価

動的特性は周波数 1～10Hz、ライン圧力大気圧～0.3Mpa(G)において、流量測定値と位相の追従性は周波数を高くすると位相が遅れるが10Hzまで使用できることわかった。また、円柱周りで発生する渦の影響はカルマン渦の発生周波数について評価を行い影響のないことがわかった。

これらの評価をもとに管径 16mm、ピトー管外形 6mm のピトー管流量計の実用製品を 5 台試作した。その性能は実用化の目標の流量測定レンジ 20:1 以上、器差性能 $\pm 3\%$ (of RD) を達成した。

この結果、製品を実用化する目途がついた。また、後流圧はライン圧より負圧となることが判明したことにより、後流差圧検出孔を後流側にすることによるダスト、ミストの閉塞対策と浸入を防ぐことができることが分かった。

今後、作業用空気ラインの流量測定用に検討を進める。

参考文献

- 1) R.W.Miller : Flow Measurement Engineering Handbook, McGraw-Hill(1996)
- 2) Kazumitsu Nukui, Tatsuya Funaki, Kenji Kawashima and Toshiharu Kagawa : A Study of Characteristics of Pitot Type Flow Meter, SICE Annual Conference in Fukui, CD-ROM(2003)
- 3) Ernest O.Doebelin: Measurement Systems, McGraw-Hill (1976)
- 4) Kazumitsu Nukui, et al : Static and Dynamic Characteristic Analysis of Pitot Type Flow Meter, 7th FLUCOME, CD-ROM(2003)
- 5) K. Kawashima and T. Kagawa : Unsteady flow generator for gases using an isothermal chamber, Measurement Journal of the International Measurement

Confederation, 33-4, 333/340 (2003)

- 6) Y, Nakayama and R.F. Boucher : Introduction to Fluid Mechanics, Published by Yokendo Co. Ltd (1999)

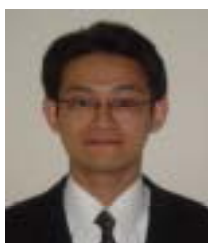
{ 著者紹介 }

温井 一光 (学生会員)



1964 年東京電機大学卒業、
1960 年東京ガス(株)入社 計測、制御関係の設計建設等、研究開発を担当
2002 年退職
現在 日本アプライドフロウ(株) 在職
東京工業大学大学院博士課程在学中

川嶋 健嗣 (正会員)



1992 年東京工業大学制御工学科
1997 年同大学大学院理工学研究科制御工学専攻博士課程修了。同年東京都立工業高等専門学校機械工学科助手、
2000 年東京工業大学精密工学研究所助教授となり、現在に至る。流体計測制御、ロボット工学に関する研究に従事(博士(工学))。計測自動制御学会、日本機械学会、日本フルードパワーシステム学会などの会員。

香川 利春 (正会員)



1974 年東京工業大学制御工学科卒業。
同年北辰電機製作所入社、1976 年東京工業大学工学部制御システム工学科助手、同講師、同助教授を経て、現在同大学精密工学研究所教授。流体制御システム、流体計測、生体計測に関する研究に従事(工学博士)。計測自動制御学会評議員、日本フルードパワーシステム学会理事、日本機械学会などの会員。

小宮 勤一 (正会員)



1954 年東京大学工学部応用物理学科卒業。島津製作所技師、日本大学理工学部助手、通産産業省工業技術院計量研究所研究官、九州工業大学教授(制御工学教室)、工学院大学(機械システム工学科)を経て現在工学院大学名誉教授。本会フェロー。流体計測、流れの可視化、プロセストモグラフィなどの研究に従事(工学博士)。応用物理学会、機械学会などの会員