

脈動水瞬時流量測定用しぼり形流量計

(昭和54年5月21日 原稿受付)

自然科学教室	石	橋	治	生
機械工学教室	松	永	成	徳
第二部機械工学科	西		道	弘
機械工学教室	塚	本		寛
北九州工業高等専門学校	中	山	博	愛
機械工学教室 (大学院)	中	村	文	寿

Study on a Nozzle Flowmeter for Measuring Instantaneous Flow-rate in Pulsating Water Flow

by Haruo ISHIBASHI
Shigenori MATSUNAGA
Michihiro NISHI
Hiroshi TSUKAMOTO
Hiroyasu NAKAYAMA
Fumitoshi NAKAMURA

Abstract

For steady and quasi-steady flow, differential type flowmeter are applied to measure the flow-rate with a reasonable accuracy. However, in the case of pulsating flow, it is known that large errors in the measurement may be result by use of differential type flowmeter.

The purpose of the present investigation is to develop the technique to measure instantaneous flow-rate by improved nozzle flowmeters, where three pressure taps are mounted at different section and two sets of instantantaneous diffential pressure are measured.

For comparison, the pulsating flow is measured simultaneously with a multi Pitot tube mounted on the pipe downstream of the nozzle and the mean flow-rate is also measured with a triangular weir notch.

According to the test results, it is proved that the present technique to read two sets of the differential pressure in the nozzle is sufficiently effective to use for the pulsating water flow measurement.

1. まえがき

定常流量の測定に広く使用され、信頼性の高い、しぼりによる差圧型流量計は、最近その精度、信頼性、再現性の面から再検討され^{1),2)}脈動流量の測定については、今世紀当初から往復機関系の流量測定誤差について多くの研究がなされてきた³⁾。

しかし従来この種の研究では、例えば Sparks⁴⁾の力学的考察や Mottram & Zarek⁵⁾らのように理論や従来の

流量係数を修正する方向での研究が多く、実際面での解決は得られていないようである。

本報告は、すでに報告したしぼり形瞬時流量計の軸対称理論⁶⁾に基づき、瞬時および平均流量を演算出力する二差圧演算流量計⁷⁾の実用性を確かめるとともに、脈動する管内流れの特性を明らかにする基礎研究として、多点全圧管による速度分布の計測法を開発しようとするものである。

2. 記号

A_R	球面の部分面積
C_{12}, C_{23}	一差圧流量係数
C_V	流量係数
C_W	流量係数
C_{WV}	流量係数
D	直径
EPS	標準偏差
f	脈動周波数
FSP	尺度係数
g	重力の加速度
Δh	差圧ヘッド
i	高調波次数
K	形状パラメータ
L	形状パラメータ
n	ロータリバルブ回転数
o	座標原点
p	圧力
$q = Q/Q_{AV}$	無次元振幅
Q	体積流量 (瞬時流量)
Q'	三次元吸込み強さ
\dot{Q}	流量の時間変動率
Q_{AV}	平均流量
Q_V	速度分布積分流量
Q_W	せき平均流量
r	ϕ 32管の半径方向座標
R	球半径
$Re = u_3 D_3 / \nu$	レイノルズ数
SB	零点
$St = f D_3 / u_3$	ストロハル数
t	時刻
T	周期
u	軸方向平均流速
U	軸方向瞬時流速
V_R	球半径方向流速
Z	流路軸方向座標
γ	単位体積重量
ϕ	流路子午面角
ν	動粘性係数
Ω	立体角

添字

1, 2, 3 流れの上流から下流への半径位置を示す

s	静圧, 定常値
t	全圧
①~⑤	全圧管半径位置

3. 理論流量測定式

図-1に示す円すい形しほりモデルの原点 o に三次元吸込み Q' があるときの非旋回流れに対して非粘性, 非圧縮性を仮定し, 軸方向3断面における2組の差圧を用いれば, 圧力方程式(1), (2)の非定常項を消去した流量測定式は式(3), また流量の時間変動率は式(4)のようになる。

$$2g\Delta h_{12} - K_{12}Q^2 - L_{12}\dot{Q} = 0 \quad (1)$$

$$2g\Delta h_{23} - K_{23}Q^2 - L_{23}\dot{Q} = 0 \quad (2)$$

$$Q = \left\{ \frac{2g}{K_L} (L_{23}\Delta h_{12} - L_{12}\Delta h_{23}) \right\}^{1/2} \quad (3)$$

$$\dot{Q} = -\frac{2g}{K_L} (K_{23}\Delta h_{12} - K_{12}\Delta h_{23}) \quad (4)$$

ここに,

$$\left. \begin{aligned} K_{12} &= (A_{R1}^2 - A_{R2}^2) / (A_{R1}A_{R2})^2 \\ &= (R_1^4 - R_2^4) / (\Omega^2 R_1^4 R_2^4) \\ K_{23} &= (A_{R2}^2 - A_{R3}^2) / (A_{R2}A_{R3})^2 \\ &= (R_2^4 - R_3^4) / (\Omega^2 R_2^4 R_3^4) \\ L_{12} &= 2(1/R_2 - 1/R_1) / \Omega \\ L_{23} &= 2(1/R_3 - 1/R_2) / \Omega \\ K_L &= K_{12}L_{23} - K_{23}L_{12} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta h_{12} &= (p_1 - p_2) / \gamma + z_1 - z_2 \\ \Delta h_{23} &= (p_2 - p_3) / \gamma + z_2 - z_3 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

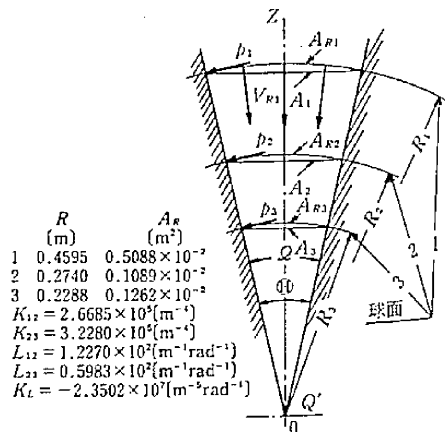


図-1 しほりモデル形状と記号

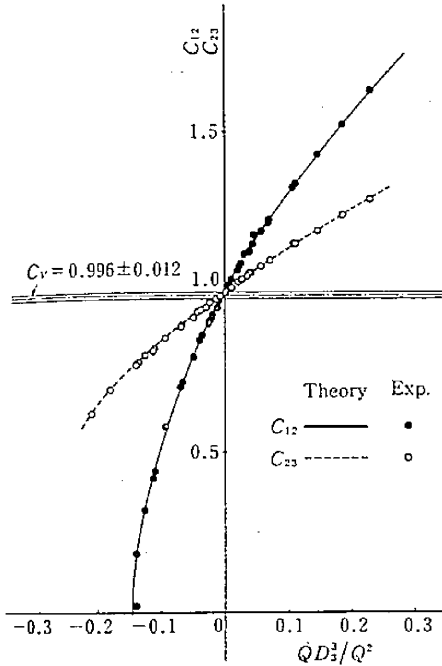


図-2 一差圧流量におよぼす脈動加速度の影響

このときの時間平均流量は式(7)で与えられる。

$$Q_{AV} = \frac{\sqrt{2g}}{T} \int_0^T \left\{ \frac{1}{K_L} (L_{23} \Delta h_{12} - L_{12} \Delta h_{23}) \right\}^{1/2} dt \quad (7)$$

なお式(1)において \dot{Q} を無視した場合の流量(一差圧流量)は $Q_{12} = (2g \Delta h_{12} / K_{12})^{1/2}$ となるから、これを式(1)に代入して差圧を消去し、両辺を瞬時流量 Q で除して Q_{12}/Q を一差圧流量係数 C_{12} とすれば、つぎの式(8)が得られ、同様にして式(2)より C_{23} が得られる。

$$C_{12} = \{ 1 + L_{12} \dot{Q} / (K_{12} Q^2) \}^{1/2} \quad (8)$$

図-2はこの脈動加速度 \dot{Q} の影響を示したもので、 Q を時刻の関数として与え、式(8)によって C_{12} の理論値とし、式(3)、(4)の Δh_{12} 、 Δh_{23} に各種周波数の脈動実験による測定値を入れて Q および \dot{Q} を求め、実験で得られた Q_{12} と Q の比を C_{12} の実験値としている。

図より脈動加速度が一差圧流量に及ぼす影響が明らかにされ、また理論値と実験値とが良く一致していることから、軸対称ポテンシャル流れの仮定が実験範囲で成立していることがわかる。また C_{12} は C_{23} よりも大きく変動しているが、これは取圧孔間の軸方向距離が大きく、

加速度の影響が大きいためである。

$C_v (= C_v/Q, C_v$ は多点全圧管による瞬時流量) は脈動ストロハル数0.011における実験値の一例で、平均値および標準偏差はそれぞれ0.996、 ± 0.012 となっており、加速度の影響をほとんど受けていないことがわかる。

4. 実験装置, 実験方法および計測処理

4.1. 実験装置および実験方法

図-3は本研究に用いた実験装置全体図である。地下水槽からタービンポンプで圧力タンクへ送水し、5 B直管部、縮流部、4 B直管部を垂直降下させる。この下流に供試円すい形しぼりを装着する。このしぼり出口に速度分布検出部をもった $\phi 32$ 直管を接続し、この出口直後にロータリバルブを設置する。このバルブを最大および最小抵抗の位置で固定すれば二種の定常流れが得られ、回転すれば非定常流れが得られる。バルブより噴出した水は制水水槽を経て直角三角せきで量水され、再び地下水槽へ戻る。

供試しぼりは図-1に示すように縮小角 ϕ が10°の円す

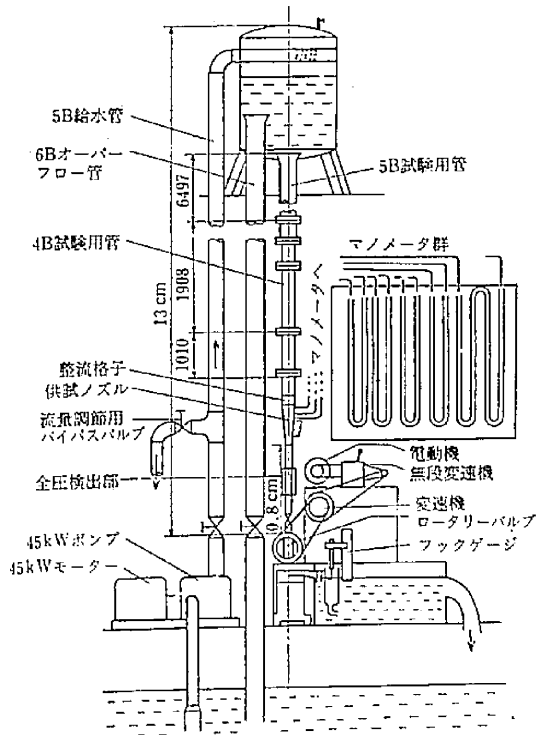


図-3 実験装置全体図

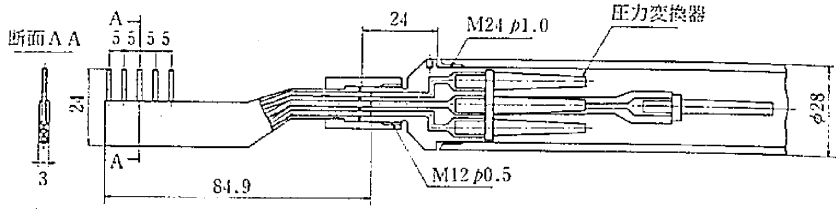


図-4 多点全圧管

い形であり、圧力測定断面は軸方向に3箇所あり、各断面二系統の取圧孔を設け、準定常状態測定のためのマンメータ用ピニオン管および、瞬時流量測定のための圧力変換器(定格 5 kgf/cm^2)をそれぞれ制動管を介して接続する。またマンメータは水制動によって水銀面を安定させて測定した。速度分布検出部には図-4に示した多点全圧管(本研究では5点)と壁面静圧孔を設置し、圧力変換器によって瞬時流速分布を測定した。圧力変換器はそれぞれ制動管をもち、シリコンオイルによってゲイン増大を制限している。取圧系の周波数特性試験結果は図-5に示したとおりである。

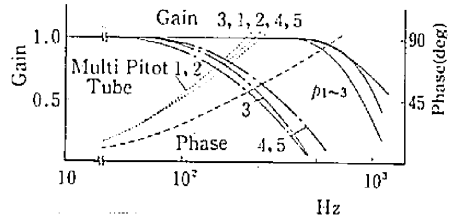
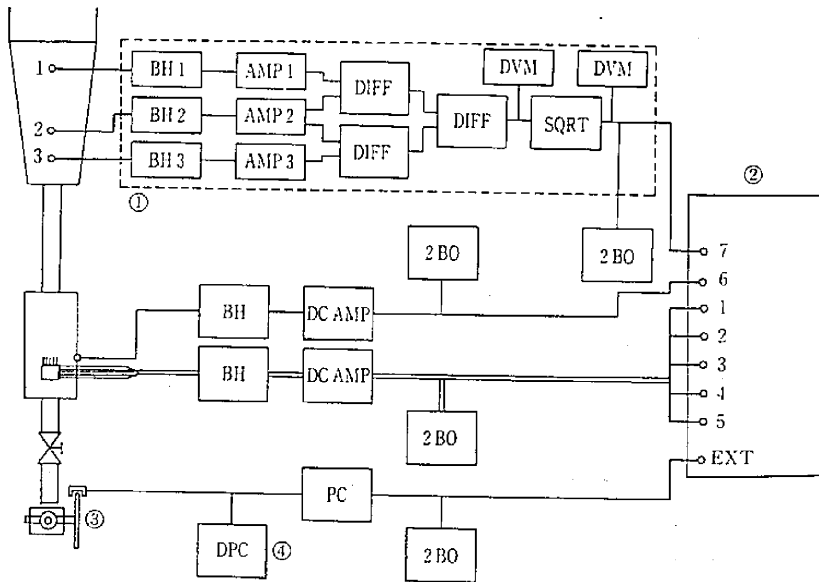
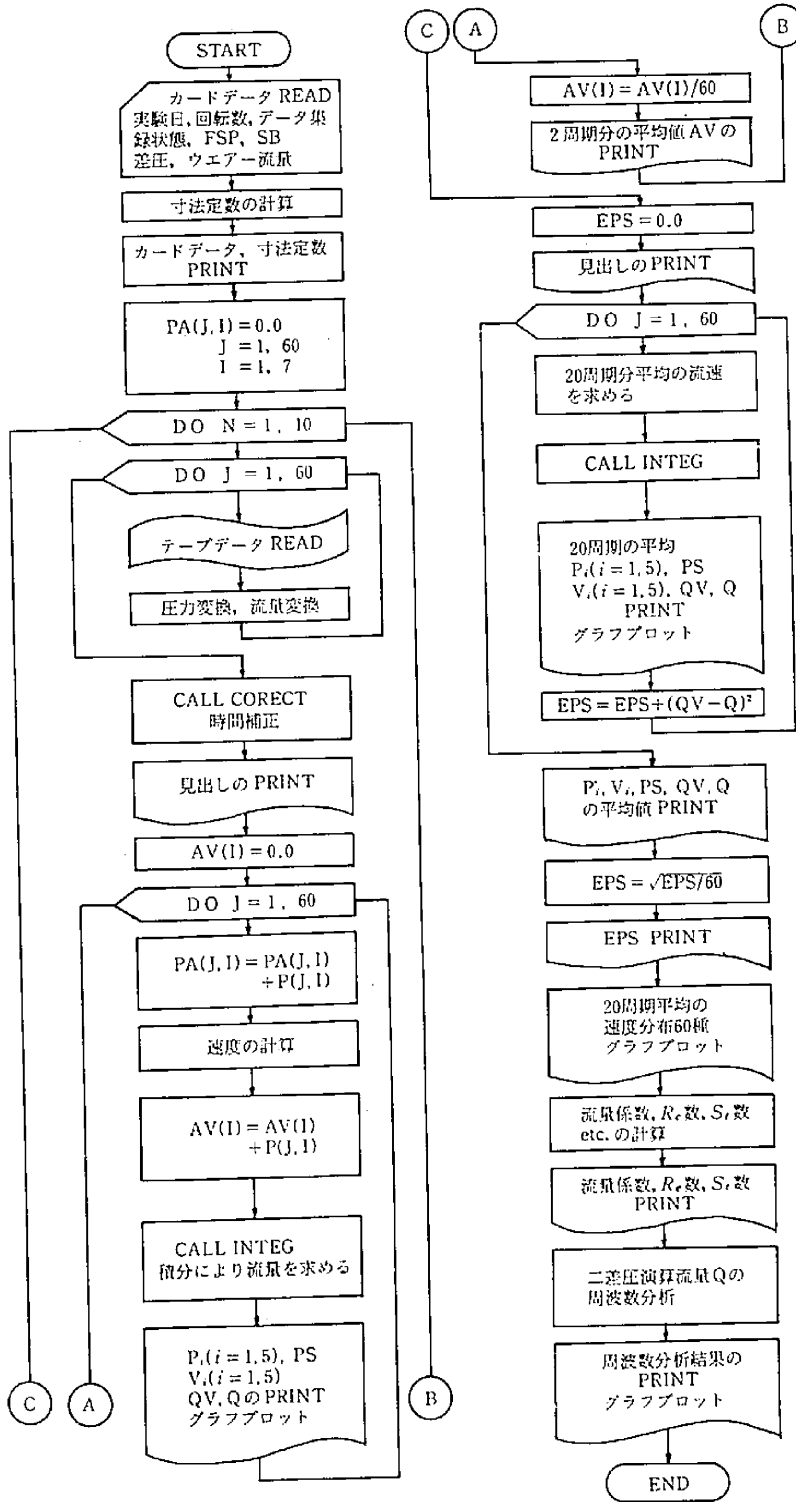


図-5 周波数特性試験結果



- ① 二差圧演算部 ② デジタルデータ集録装置
- ③ 光電ピックアップ ④ デジタルパルスカウンター
- BH:ブリッジヘッド DIFF:差演算部
- PC:波形整形器 AMP:DCアンプ SQRT:開平方演算部
- DVM:デジタルボルトメータ 2BO:二現象オシロスコープ

図-6 計測系統図



図一七 処理プログラムの流れ図

図-6は計測系統図である。しほり3断面における圧力は二差圧演算部①によって瞬時流量 Q に変換される。5点の全圧および壁面静圧の電圧信号は直流増幅されて Q と同時にデジタルデータ集録装置②に記録される。ロータリバルブの回転位相は60個の小孔を有する回転円板と光電ピックアップ③によって位相パルスとして出力され、データはその位相パルスごとに記録された。なおロータリバルブの回転速度 n はデジタルカウンタ④によって計測した。

圧力変換系は実験中30分ごとに高低2つの静的圧力によって検定され、尺度係数 FSP と零点 SB の値の変化は1%以内であった。

二差圧演算流量計の電気的安定性と動特性は0~5 kHzの帯域でフルスケールの0.5%以内となっている⁸⁾。

4.2. 計測処理

前項の測定結果は紙テープに出力し、検定基準データ、しほりの寸法定数はカード入力して、図-7に示す流れ図によって処理した。なおこの処理とは別にしほり断面1, 2および3の圧力を直接デジタル処理した場合もある。

結果は二差圧瞬時流量 Q 、その時間平均 Q_{AV} 、三角せきによる流量 Q_W 、瞬時流速分布から求めた流量(速度分布積分流量) Q_V を用いて、各種流量係数で次のように表わした。

$$C_V = Q_V/Q, C_W = Q_W/Q_{AV}, C_{12} = Q_{12}/Q, C_{23} = Q_{23}/Q$$

なお Q_V は5点の全圧と壁面静圧との差からそれぞれの動圧を求め、等面積法(5点法)の代表半径位置における流速を補間あるいは補外によって求め、 $U \sim r^2$ 曲線に台形公式を適用して求めた。

5. 実験結果

5.1. 瞬時圧力と瞬時流量

図-8, 9は $f = 5.3 \sim 34$ Hz ($S_t = 0.027 \sim 0.18$), $Re = 2.8 \sim 3.3 \times 10^5$ において得られた実験結果の一部である。

図-8は断面1, 2および3の圧力脈動状態の2周期分を示したものである。波形には高調波成分が含まれているが、三波形の相似性は良好である。図-9は代表的な3種類の脈動周波数における測定流量 Q および差圧ヘッド Δh_{12} , Δh_{23} の変動状態を2周期にわたって示している。差圧に対する流量の位相遅れは(a), (b), (c)を比較

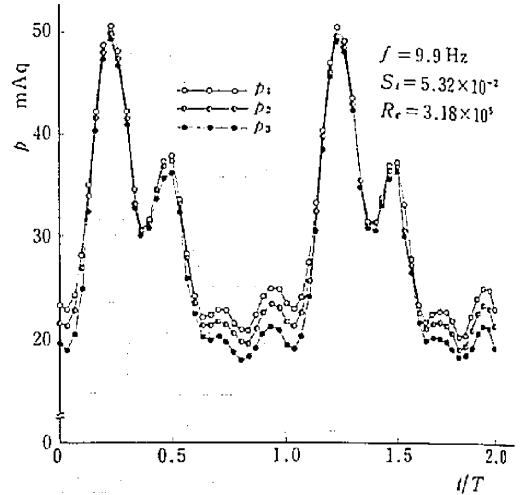


図-8 脈動圧力測定例

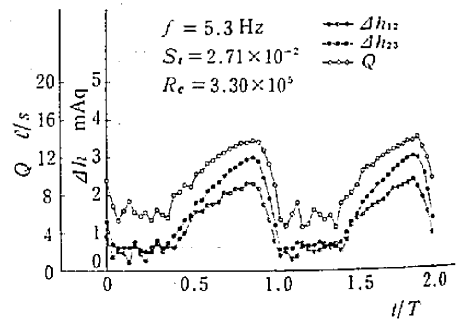


図-9-(a) 瞬時流量と差圧の変動状態

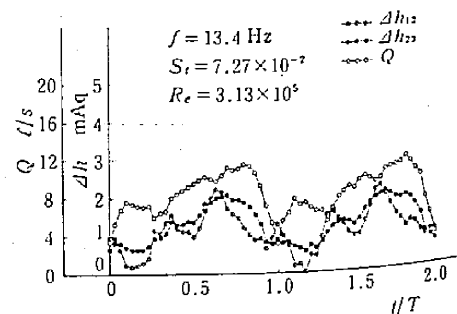


図-9-(b) 瞬時流量と差圧の変動状態

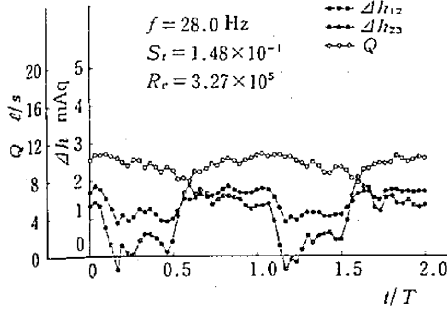


図-9-1(c) 瞬時流量と差圧の変動状態

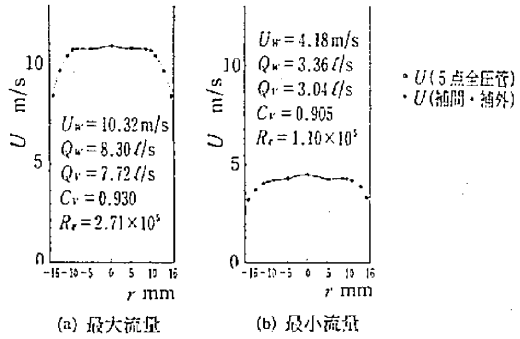


図-11 定常速度分布

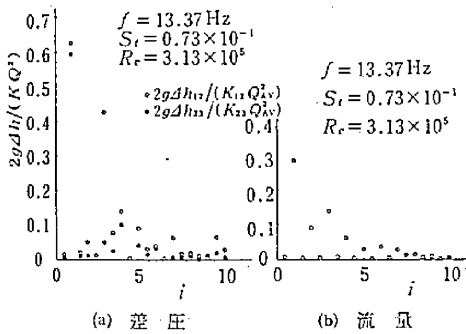


図-10 脈動流れの周波数分析

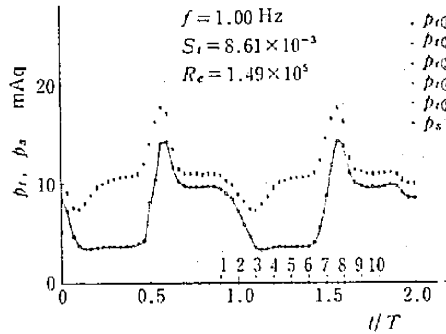


図-12-1(a) 全圧と静圧の変動状態

すると明らかのように脈動周波数の増加にしたがって大きくなっているが、これは理論計算と傾向的に一致している。また(c)では差圧ヘッド Δh_{12} が負になる瞬間もあるが、二差圧演算流量 Q は○で示すように正常に測定されていることがわかる。なお差圧および流量を周波数分析した結果の一例を図-10に示す。(a)、(b)を比較すると、差圧は流量に対して高調波成分が大きい、これは流量と差圧の間の非線形性によるものである。

5.2. 瞬時流量と速度分布

図-11はロータリバルブを最大および最小流量の位置で固定し、5点全圧管を管路中心位置に固定して計測した定常速度分布を示している。ただし5点全圧管による測定流速を○で示し、●は補間あるいは壁付近を $1/n$ 乗則で近似した補外値を示している。主流部はほぼ平坦になっており、乱流の定常速度分布に近いと思われる。このときの定常流量係数 $C_{vrs} = (Q_v/Q_w)_s$ は最大流量で0.930、最小流量で0.905となっている。

図-12は、5点全圧管を管路中心位置に固定して、 $f = 1.0 \text{ Hz}$ ($S_r = 8.61 \times 10^{-3}$), $R_c = 1.49 \times 10^5$ における脈

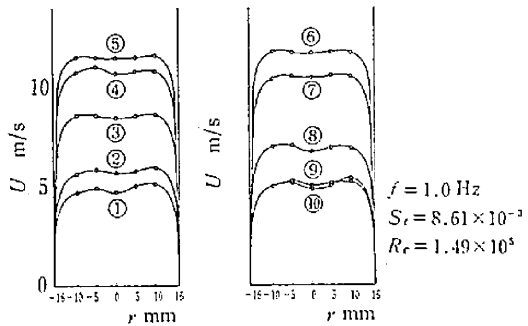


図-12-1(b) 瞬時流速分布

動状態を測定した結果の一例である。(a)は5点の全圧および壁面静圧の変動状態、(b)は瞬時流速分布である。なお図中の①~⑩の数字は、速度分布積分流量 Q_v が最小の時刻からの1周期を10等分した位相に対応しており、(a)の横軸の一点鎖線(小数字1~10)とも対応している。(c)は速度分布積分流量 Q_v の変動状態と同時測定し

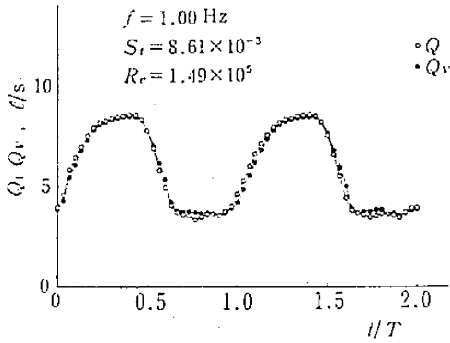


図-12-(c) 瞬時流量

図-12 脈動流の測定例

た Q とを比較したものである。 Q_v, Q 両波形は傾向的にも量的にもよく一致していると思われる。

5.3. 流量係数

図-13は、脈動ストロハル数 S_i に対する各種流量係数の値をまとめたものである。二差圧演算流量 Q を時間平均した値と Q_w の比 C_w は、 $S_i = 0.008 \sim 0.18$ において平均値 $\bar{C}_w = 1.021$ 、標準偏差 0.027 が得られ、脈動流量の平均値は良好に測定されている。また瞬時流速分布から求めた Q_v と二差圧演算流量 Q の比 C_v は $S_i = 0.008 \sim 0.014$ の範囲で $\bar{C}_v = 0.985$ 、標準偏差 0.005 となり良好な値が得られた。

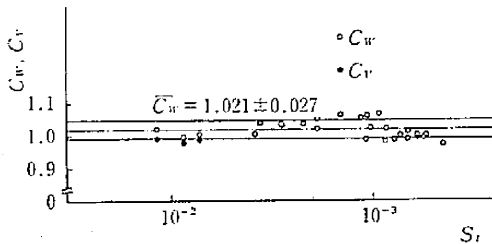


図-13 流量係数とストロハル数との関係

C_v を高い S_i 数について求めるには多点全圧管の周波数特性を向上し、同時測定点の数を増して、 Q_v の精度を向上することが必要と考えられるが、しほりを一次計器とした二差圧演算流量計については、低ストロハル数では瞬時値の相対精度が、高ストロハル数では平均値の一致による推定精度が明らかになり、その実用性が示された。

6. 結論

円すい形しほりに対して、二差圧演算流量計および5点全圧管を用い、広いストロハル数について流量係数を実験的に求めた結果、つぎのことが明らかになった。

- (1) 平均流量係数 $\bar{C}_w = 1.021$ 標準偏差 0.027 となり、本実験における S_i 数の範囲で、 C_w はほぼ一定とみなすことができる。すなわちしほり形流量計の脈動ストロハル数による測定限界は、二差圧方式によって実質上とりのぞくことができた。
- (2) 二差圧演算流量 Q と同時測定した Q_v は、 S_i 数が 1.35×10^{-3} 以下の範囲では、良好な一致を示し、両者の偏差は 0.005 となり二差圧流量瞬時値の相対精度も明らかにされた。
- (3) しほり形流量計の差圧に対する脈動加速度の影響が、ポテンシャル流れを仮定して予測できることを実験的に示した。

最後に、本研究をすすめるにあたり、御援助していただいた北九州工業高等専門学校園清行夫教授をはじめ、本学流体工学研究室の三谷良平、宇野美津夫両枝官ならびに、卒業研究として熱心に協力した三菱重工・田中文夫氏、BSタイヤ・田籠敏氏、阪大大学院・川越浩一氏、田辺製薬・山口光治郎氏の各位に深く謝意を表する。

参考文献

- 1) Benedict R. P. & Wyler J. B., ASME. Paper. No. 73-WA/FM-6 (1973-12), 1.
- 2) Miller R. W. & Kneisel O., Trans ASME. Ser. 1. 96-2 (1974-6), 139.
- 3) Halmi D., Trans. ASME. Ser. 1. 96-2 (1974-6), 124.
- 4) Oppenheim A. K. & Chilton E. G., Trans. ASME. 77 (1955), 231.
- 5) Sparks C. R., Fluid Dynamic Measurement, ASME. (1971), 1.
- 6) Mottram R. C. & Zarek J. M., The Symposium on the Measurement of Pulsating Flow. J. M. E. (1970), 25.
- 7) 松永・黒川, 九州工業大学研究報告(工学), No. 27 (1973-8), 59.
- 8) 石橋・松永, 九州工業大学研究報告(工学), No. 32 (1976-3), 101.
- 9) 松永ほか4名, 日本機械学会講演論文集, No. 780-11, 82.