

気液二相流時における 180°ベンド流量計の特性

小栗 幸正*, 水谷 正和*, 宇陀 秀明**

Characteristics of a 180° Bend Flowmeter for Gas-Liquid Two-Phase Flow

Yukimasa OGURI*, Masakazu MIZUTANI* and Hideaki UDA**

(Received May 31, 1995)

This paper describes experimental results of 180°-bend flowmeters having a radius ratio of bend $R/a=4.0$ and 5.0 for gas-liquid two phase flow. The gas-liquid volumetric flow ratio less than 0.3 and the flow direction of this flowmeter set up three ways; horizontally (type 1), vertically upwards (type 2) and vertically downwards (type 3), respectively. The bubble size and its distribution were examined by visualizing the flow through a transparent bend wall.

1. まえがき

ベンド流量計の研究は、最初 Jacobs ら⁽¹⁾が行って以来、多くの研究者によってなされてきた。近年では村上⁽²⁾、小栗^(3,4,5)、伊藤^(6,7,8)の研究がある。これらの研究は流れ状態が単相流の場合であるが、最近では、気液二相流の流れ状態に移行する傾向になり、らせん管や90°エルボ流量計内の二相流に関する研究^(9,10,11)が行われている。

本研究は、曲がり半径比 R/a を 4.0 と 5.0 にとった 180°ベンド流量計の上流側の水平管に接続し、流動状態は単相流からボイド率 α が 0.3 以下の気液二相流とし、ベンド内の流れは水平流れ (タイプ 1)、垂直上向き流れ (タイプ 2)、垂直下向き流れ (タイプ 3) の 3 通りに変化させて、圧力係数、流量係数などの特性に及ぼす流れ方向の影響を実験的に調べ、単相流における特性と比較検討した。さらに 3 通りのベンド内の流れを写真撮影で可視化し、その流動状態を観察した。

2. 記号

本論文に用いた主な記号を下に示す。

A	: 曲がり管の流路断面積
a	: 曲がり管の内半径
C_d	: 流量係数
C_p	: 圧力係数
d	: 管内径
g	: 重力加速度
H_D	: 下流側直管 D 断面の平均壁圧ヘッド
H_E	: 基準断面 E の平均壁圧ヘッド
H_U	: 上流側直管 U 断面の平均壁圧ヘッド
H_i	: ベンド内外壁の各壁面圧力ヘッド
ΔH_d	: ベンド内外壁の差圧ヘッド差
ΔH_f	: 基準断面 E と上流側直管の断面 U との差圧ヘッド
ΔH_l	: 基準断面 E と下流側直管の断面 D との差圧ヘッド
ΔH_p	: 基準断面 E の壁圧ヘッド H_E と各測圧孔の壁圧ヘッド H_i との差圧ヘッド
L_i	: 基準断面 E から各測圧孔までの管軸長さ
L_j	: ベンド入口から各測圧孔までの管軸長さ
Q_a	: 空気の体積流量
Q_w	: 水の体積流量
R	: ベンド管中心軸の曲率半径
Re	: 水のみかけのレイノルズ数

*機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

**機械工学専攻大学院生 (Graduate Student, Mechanical Engineering)

- V_m : 管内平均流速
- α : ボイド率
- ξ : 曲がり管損失係数
- θ_i : 曲がり管入口よりの曲がり角
- λ : 管摩擦損失係数
- ν_w : 水の動粘度
- ρ : 二相流の平均密度
- ρ_w : 水の密度

3. 実験装置と方法

3.1 実験装置の概要

実験装置の概要を図1に示す。地下水槽か揚水ポンプ①によって高さ12mのオーバーフロータンク②に汲み上げられた水は、オーバーフロー管③で水位を一定に保たれて送水管を通過し、流量調節弁④で流量を調節された後、整流タンク⑤から空気取り入れ口⑥を通り、ここで空気が混入されて二相流となる。この二相流は上流側直管⑦(内径 $d_0=50.0\text{mm}$, 長さ $l_0=3.25\text{m}$ のアクリル製円管) を通って 180°ベンド流量計⑧に流入し、そこを通過後、下流側直管⑨(内径 $d_0=50.0\text{mm}$, 長さ $l_0=2.5\text{m}$ のアクリル製円管) を通って秤量タンク⑩に流れ、ここで水の流量を測定された後、再び水槽に戻される。一方、空気はコンプレッサー⑪によって一定の圧力(0.2MPa)で圧力タンク⑫に蓄えられ、空気流量調節弁⑬で流量調節された後、流量測定用オリフィス⑭を経て空気取り入れ口⑥に導かれる。

図2は180°ベンド流量計およびその上流側と下流側の直管の詳細を示した図で、ベンド入口より $30d$ 上流

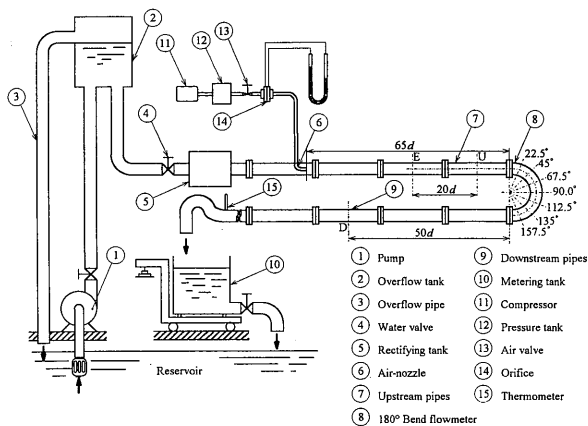


図1 実験装置の概要

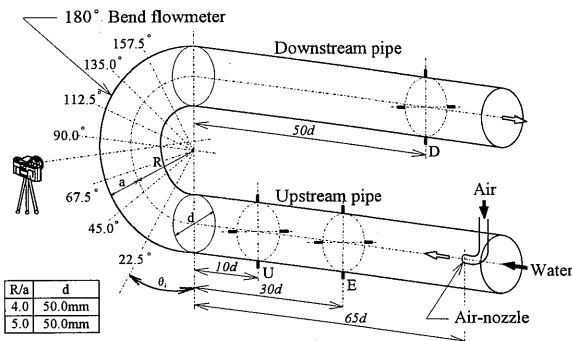


図2 180°ベンド流量計とその前後

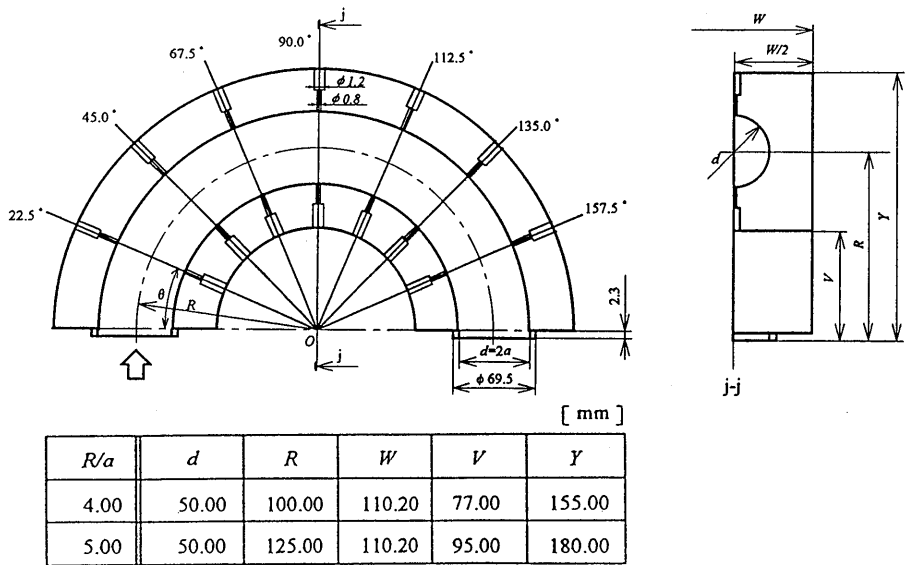


図3 ベンド流量計の概要

側の断面 E に 4 個の壁圧測定孔 (孔径 0.8mm) の平均を基準壁圧ヘッドとして, 180°曲がり部内外壁の圧力分布を求めた。また, 10d 上流側の断面 U に 4 個の壁圧測定孔 (孔径 0.8mm) を設け, 断面 E と U の壁圧ヘッド差 ΔH_t から管内の管摩擦損失を求めた。さらに, ベンド出口より 50d 下流側の断面 D の位置に 4 個の壁圧測定孔を設け, 断面 U と D との壁圧ヘッド差からベンド流量計の損失を求めた。流量計内の流動状態は写真撮影によっても観察した。

3.2 180°ベンド流量計

本研究に用いた 180°ベンド流量計の概要を図 3 に示す。これは, アクリル製円盤状の素材を所定寸法に正しく機械加工した後半分に切断し, これを重ね合わせた二つ割れ構造の特製ベンドで, 曲がり半径比 R/a は 4.0 と 5.0 の 2 種類にした。ベンド入口より曲がり角 θ_i を, 図のように 22.5° 間隔にとった 7 断面の各内壁側と外壁側の中央に壁圧測定孔 (孔径 0.8mm) を設け, それぞれの壁圧ヘッド H_i を逆 U 字形多管マンノメータに導き, 各壁圧ヘッドの値を精度 1/100mm のカセットメータで読み取り, それぞれの内外壁圧ヘッド差 ΔH_d を求めた。流量計の設置条件は, 図 4 に示すようにベンド内の流れが水平流れ (タイプ 1), 垂直上向き流れ (タイプ 2), 垂直下向き流れ (タイプ 3) の 3 通りとした。

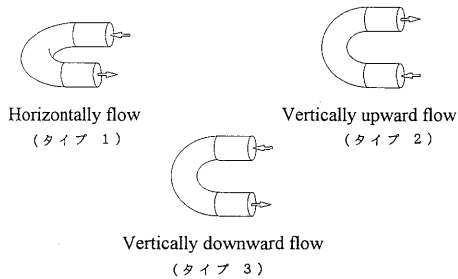


図 4 流量計の設置条件 (流れ方向)

4. 実験結果と考察

4.1 圧力分布

180°ベンド流量計の壁圧分布状況を調べるため, 次式で定義される無次元の圧力係数 C_p を用いた。

$$C_p = \lambda \frac{L_i}{d} + \xi \frac{L_j}{\pi R} - \frac{\Delta H_p}{V_m^2 / (2g)} \quad (1)$$

ここで, λ は管摩擦係数, L_i は基準断面 E から各測圧孔までの管軸長さ, ξ は曲がり管損失係数, L_j はベンド入口から各測圧孔までの管軸長さ, V_m は管内平均流速, ΔH_p は断面 E における壁圧ヘッド H_E と各測圧孔の壁圧ヘッド H_i との差圧ヘッドで, 次式で求められる。

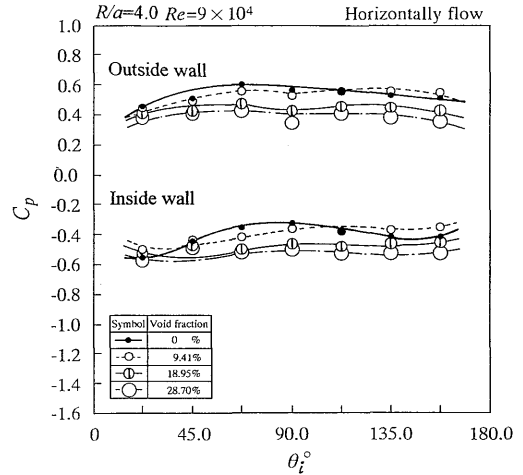


図 5 圧力係数 C_p と曲がり角 θ_i (タイプ 1)

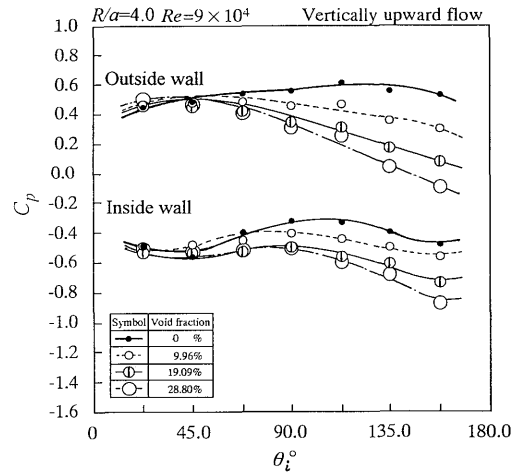


図 6 圧力係数 C_p と曲がり角 θ_i (タイプ 2)

$$\Delta H_p = (H_E - H_i) \frac{\rho_w}{\rho} \pm \frac{Q_a}{Q_w} L_i \quad (2)$$

ここで, ρ_w は水の密度, ρ は二相流の平均密度である。また, 右辺第二項は流量計の流動条件により, タイプ 1 の場合は消去, タイプ 2 の場合は符号+, タイプ 3 の場合は符号-である。なお, 以下の式における符号±は同一の取扱いとなる。

管摩擦係数 λ は次式で定義した。

$$\lambda = \frac{d}{L_i} \cdot \frac{\Delta H_t}{(V_m^2 / (2g))} \quad (3)$$

ここで, ΔH_i は流動条件により次式で求められる。

$$\Delta H_i = (H_E - H_U) \frac{\rho_w}{\rho} \pm \frac{Q_a}{Q_w} L_i \dots\dots\dots (4)$$

曲がり管損失係数 ξ は次式で定義した。

$$\xi = \frac{\Delta H_i}{(V_m^2/2g)} \dots\dots\dots (5)$$

ここで, ΔH_i は流動条件により次式で求められる。

$$\Delta H_i = (H_E - H_D) \frac{\rho_w}{\rho} \pm \frac{Q_a}{Q_w} L_i - \lambda \frac{L_i}{d} \cdot \frac{V_m^2}{2g} \dots\dots (6)$$

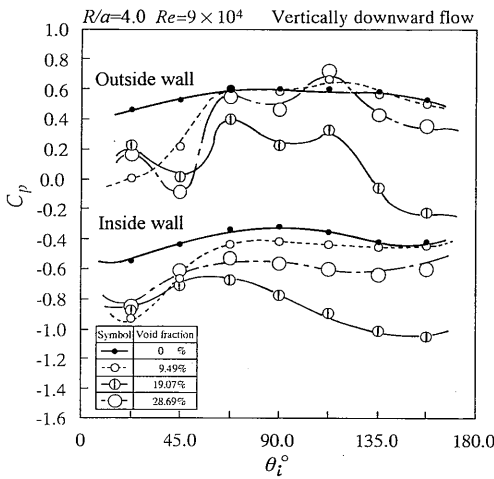


図 7 圧力係数 C_p と曲がり角 θ_i (タイプ 3)

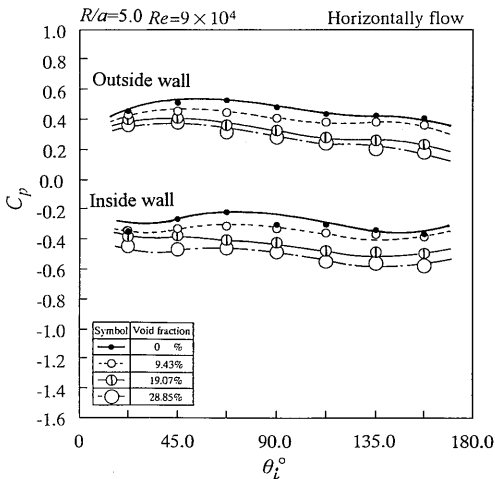


図 8 圧力係数 C_p と曲がり角 θ_i (タイプ 1)

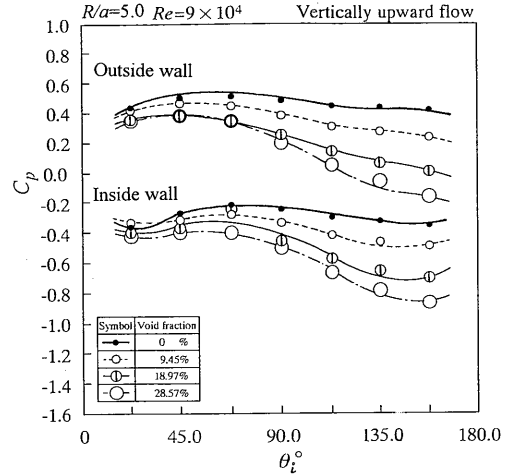


図 9 圧力係数 C_p と曲がり角 θ_i (タイプ 2)

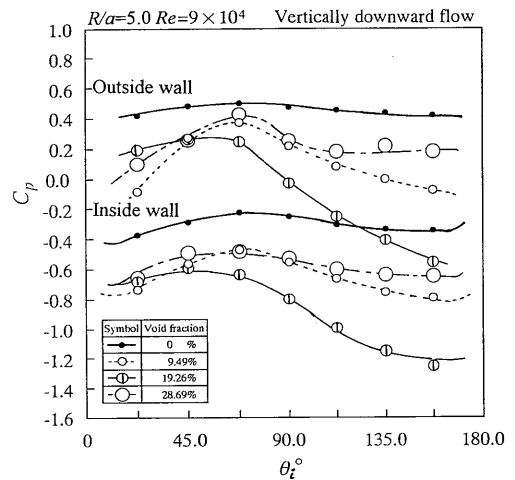
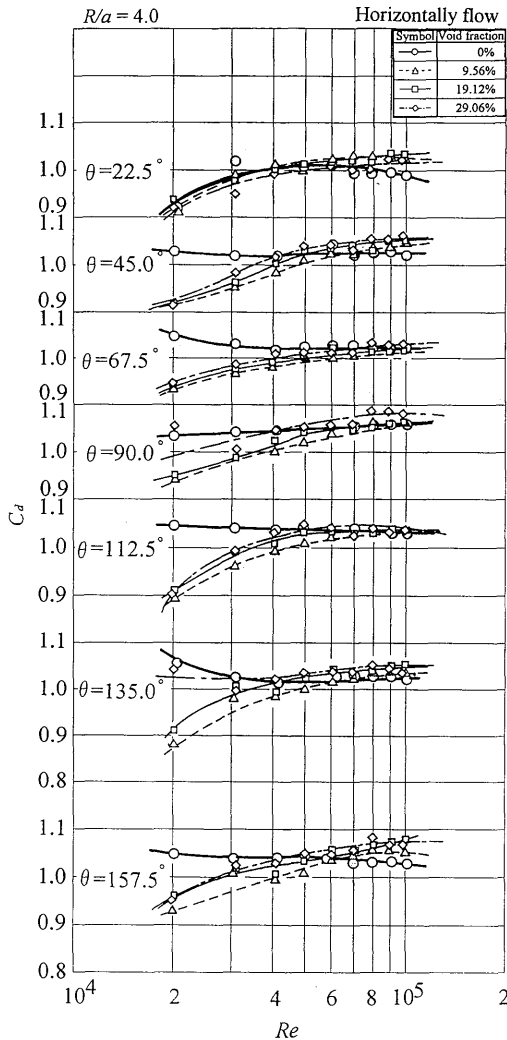
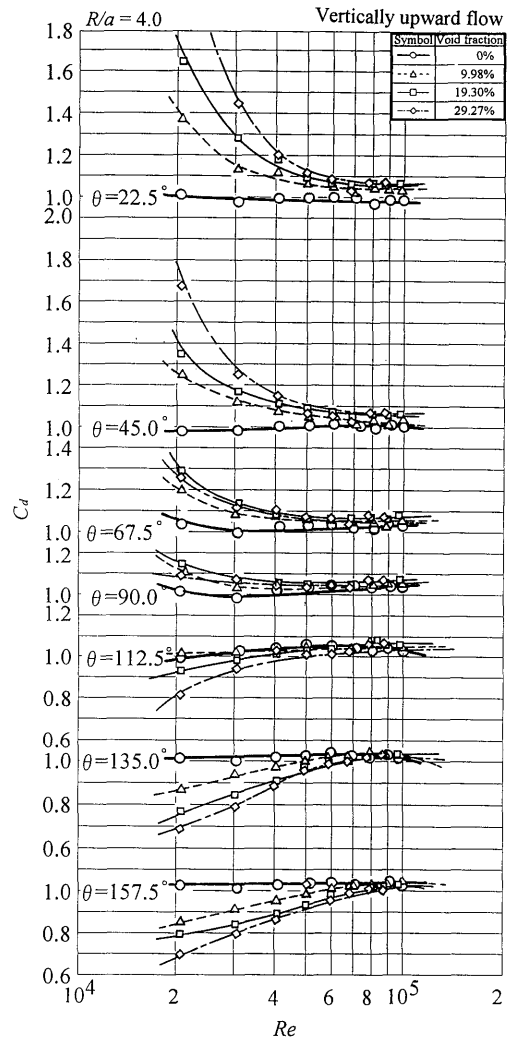


図 10 圧力係数 C_p と曲がり角 θ_i (タイプ 3)

圧力係数 C_p と曲がり角 θ_i との関係について, 曲がり半径比 $R/a=4.0$ の場合は図 5~図 7, $R/a=5.0$ の場合は図 8~図 10 に, 流量計の設置条件 (タイプ 1, 2, 3) ボイド率 α の変化に対応して示してある。ただし, Re の大小にかかわらず, 流量計の設置条件毎にそれぞれ類似の傾向がみられる。すなわち, 水平流れ (タイプ 1) の場合, 単相流と二相流の C_p 曲線は, 内外壁側ともほぼ水平状に安定し, α の大小の影響は弱いようである。しかし, 垂直上向き流れ (タイプ 2) の場合, $\theta_i \leq 45.0^\circ$ では C_p 曲線は内外壁ともほぼ同一の傾向を示すが, それ以後は α の増大に伴って, 単相流 ($\alpha=0$) の C_p 曲線より次第に右下がりに減少し, α の影響が大きく現れてくる。垂直

図 11 流量係数 C_d とレイノルズ数 Re (タイプ 1)図 12 流量係数 C_d とレイノルズ数 Re (タイプ 2)

下向き流れ(タイプ 3)の場合では、二相流の影響が大きく現れ、 $R/a=4.0$ においては、外壁側の C_p の変動振幅が著しい。 $R/a=5.0$ では、 $\theta_i \approx 67.5^\circ$ 付近の外壁側に C_p の極大値が現れる。内壁側の C_p は R/a の大小にかかわらず $\theta_i \approx 67.5^\circ$ 付近まで増大した後、 α が約 9.5 と 28.7 %の C_p はゆるやかな下降傾向になるが、 $\alpha \approx 19.3$ %の C_p は傾斜角が大きくなる。したがって、二相流時において 180°ベンド流量計を使用するとき、設置条件は、水平流れと垂直上向き流れが適切であると思われる。

4.2 流量係数

ベンド流量計の流量係数は、従来から自由渦理論、強制渦理論によるものと、絞り流量計に与える式と類似の

形によるものの 3 種類がある。本論文では著者らが従来用いてきた強制渦理論⁽¹²⁾に基づく次式の流量係数 C_d を使用する。

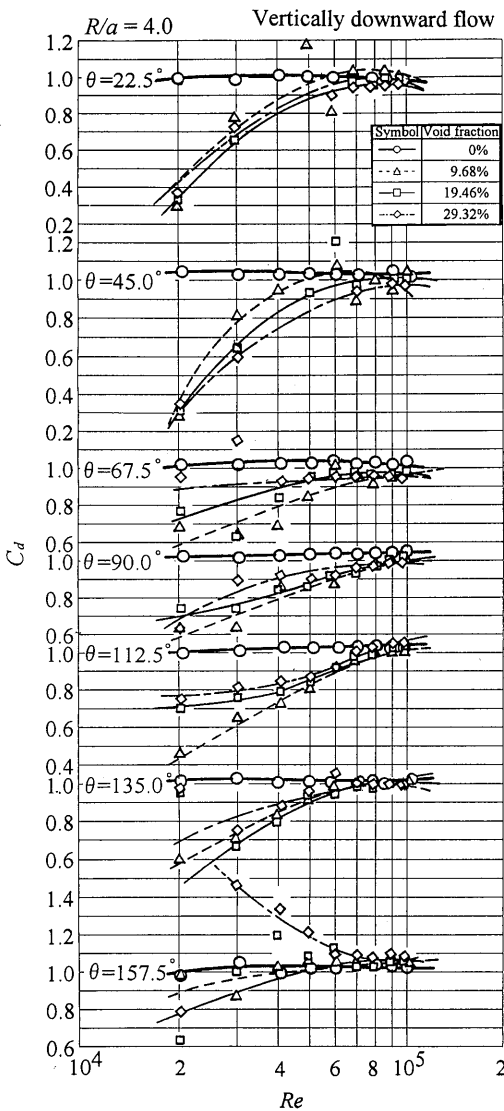
空気が混入しない場合：

$$C_d = \frac{Q_w}{A\sqrt{2g\Delta H_d}} \cdot \frac{2}{\sqrt{R/a}} \dots\dots\dots (7)$$

空気が混入する場合：

$$C_d = \frac{Q_w + Q_a}{A\sqrt{2g\Delta H_d} \cdot \rho_w/\rho} \cdot \frac{2}{\sqrt{R/a}} \dots\dots\dots (8)$$

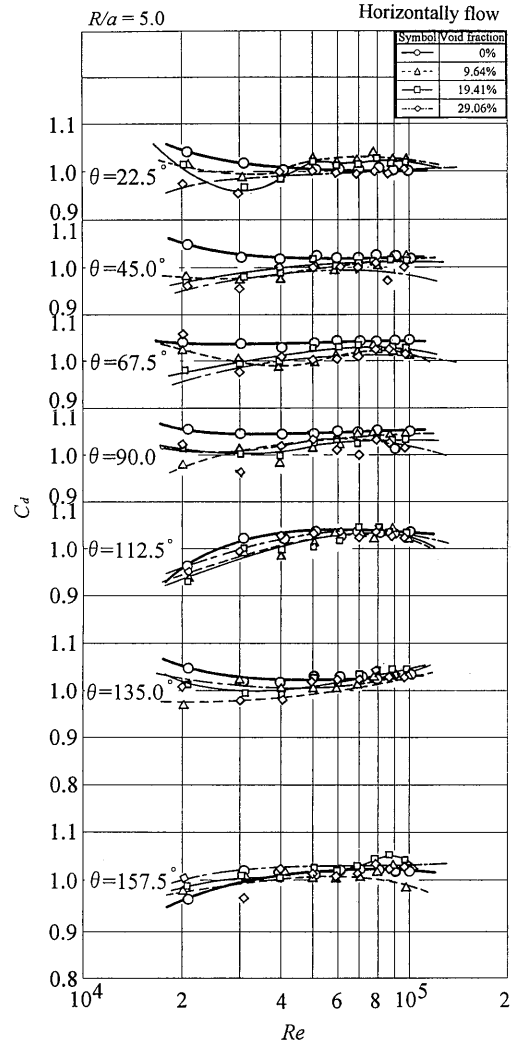
ここで、 Q_w は水の流量、 Q_a は空気の流量、 ΔH_d はベンド

図 13 流量係数 C_d とレイノルズ数 Re (タイプ 3)

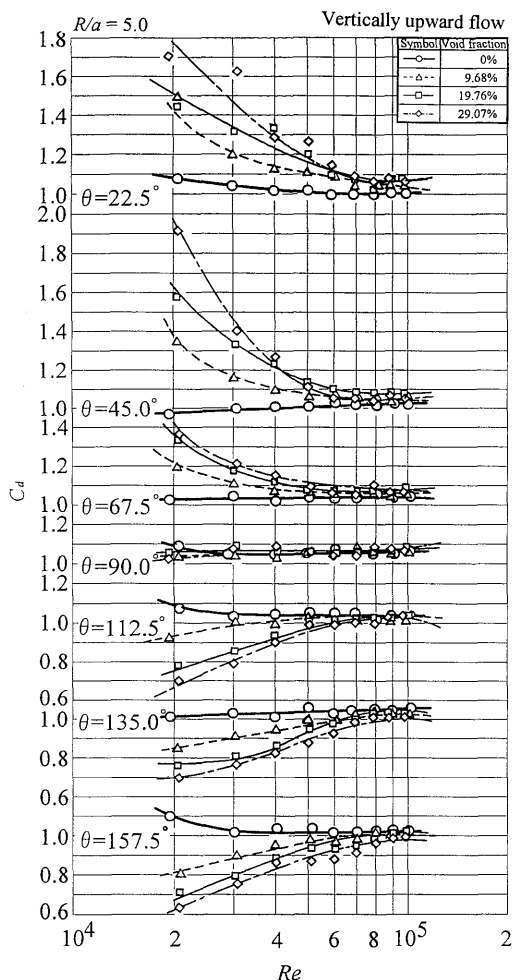
内外壁圧の差圧ヘッド, A は流量計の流路の断面積, ρ_w は水の密度, ρ は二相流時における密度である。

図 11～図 16 は, $R/a=4.0, 5.0$ の 180° ベンドの流量計に対し, ボイド率 α を $0 \sim 29.3\%$ に変え, 水のみかけのレイノルズ数 $Re = (2 \sim 10) \times 10^4$ の範囲における C_d 曲線との関係をタイプ 1, タイプ 2, タイプ 3 の設置条件ごとに示す。

まず, 図 11, 図 14 のタイプ 1 (水平流れ) の場合, $R/a=4.0$ では单相流の C_d は $\theta_i=45.0 \sim 112.5^\circ$ の範囲ではほぼ水平状に安定するが, 二相流時では C_d は右上がりの曲線になり, 流量計の機能は低下する。 $R/a=5.0$ では, 単

図 14 流量係数 C_d とレイノルズ数 Re (タイプ 1)

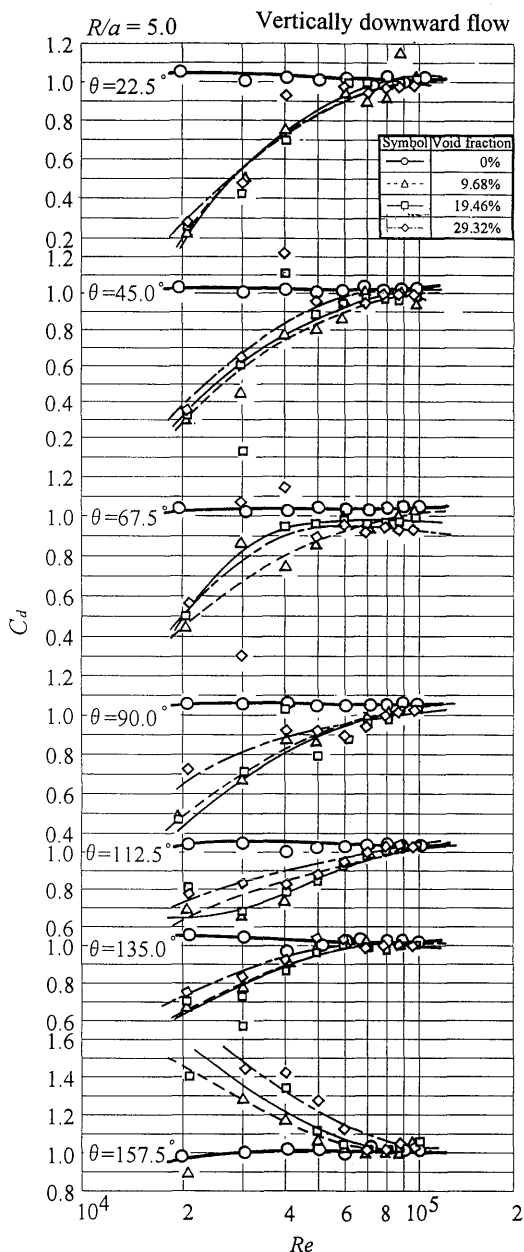
相流の場合, C_d は $Re \geq 3 \times 10^4$ で $\theta_i=45.0 \sim 90.0^\circ$ においてはほぼ水平状に安定する。しかし, 二相流時になると, C_d の一定値への収束傾向は $Re \geq 5 \times 10^4$ と遅くなる。次に図 12, 図 15 のタイプ 2 (垂直上向き流れ) の場合, 一般的にみて R/a の大小にかかわらず C_d 曲線は, 同一曲がりの角 θ_i ごとにそれぞれ類似の傾向がみられ, 单相流の C_d 曲線はいずれもほぼ水平状に安定し, さらに $\theta_i=22.5 \sim 45.0^\circ$ で最小となる。しかし, 二相流時における C_d 曲線が $\theta_i=22.5 \sim 67.5^\circ$ では右下がりの傾向を示し, $\theta_i=90^\circ$ で C_d はほぼ水平状になり, $\theta_i=112.5 \sim 157.5^\circ$ では右上がりの傾向となる。最後に図 13, 図 16 のタイプ 3 (垂直下向き流れ) になると, 单相流における C_d 曲線はタイプ 2 の場合と同様にほぼ水平状に安定するが, 二相流時

図 15 流量係数 C_d とレイノルズ数 Re (タイプ 2)

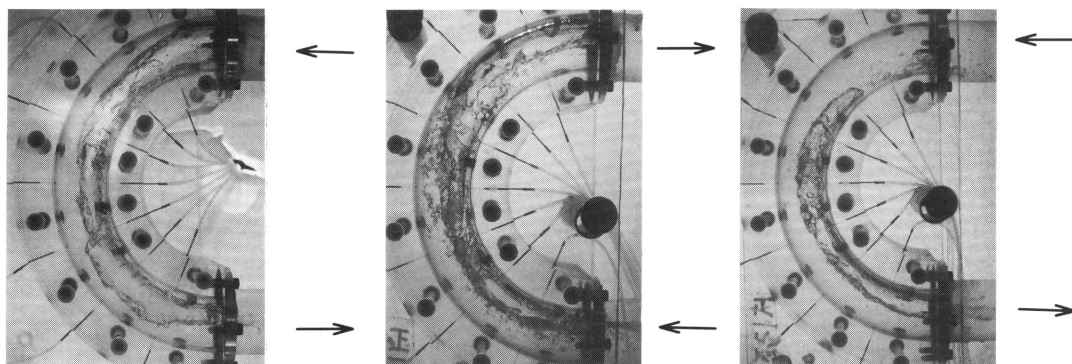
では C_d 曲線が $\theta_i = 22.5 \sim 135.0^\circ$ で右上がりの傾向になり、 $\theta_i = 157.5^\circ$ では逆に右下がりの曲線に変化する傾向が現れてくる。以上の結果より流量計としての機能は、単相流において、 $\theta_i = 22.5 \sim 90^\circ$ の測定孔の範囲が適切であり、二相流時では C_d の一定値への収束は不十分で、ばらつきが多く機能は低下する。また、流量計の設置条件では、単相流の場合において、タイプ 2 のとき C_d が最低になり、適切であると推測される。

4.3 流れの可視化

ベンド内の複雑な流動状態を調べるために写真観察を行った。図 17 はその一例で、 $R/a = 5.0$ の流量計において、水のみかけのレイノルズ数 $Re = 9 \times 10^4$ でボイド率 $\alpha \approx 30\%$ の場合で、流れ方向を前述の 3 通りとした。まず、水平流れの場合、気相はボイド率 α の増加にかかわらず上方の側壁に沿って流れる。次に垂直上向き流れの

図 16 流量係数 C_d とレイノルズ数 Re (タイプ 3)

場合、気相はベンドの内壁に沿って流れ、 $\theta_i = 90^\circ$ より下流では外壁側に移行する傾向を示す。このことから気相に働く浮力よりも液相に働く遠心力の影響の方が大きいと推測される。最後に垂直下向き流れの場合、気相は外壁側からベンド入口に流入し、 $\theta_i = 22.5^\circ$ 付近から内壁側に移行する傾向を示し、出口でほとんど管内壁側に沿って流動する。これは、気相に働く浮力と推測される。



(a) Horizontally flow

(b) Vertically upward flow

(c) Vertically downward flow

図 17 180°ベンド流量計内の流動写真 ($R/a=5.0$, $\alpha=30\%$, $Re=9\times 10^4$)

5. 結 論

気液二相流時における 180°ベンド流量計の特性について、水のみかけのレイノルズ数 $Re = (2\sim 10) \times 10^4$ 、ボイド率 $\alpha = (0\sim 30)\%$ の範囲で、流量計の設置条件を水平流れ、垂直上向き流れ、垂直下向き流れの 3 通りについて実験し、次の結論を得た。

- 1) 圧力係数 C_p の曲線は、ボイド率 α の増大に伴って右下がりの傾向を示す。また、曲がり半径比 R/a の大小に関係なく、レイノルズ数 Re が小さいときは気相の影響を大きく受け、特に垂直下向き流れの場合は複雑に変化する。
- 2) 流量係数 C_d は、単相流の場合レイノルズ数の増加とともに一定値へ収束する傾向が見られる。しかし、気液二相流の場合には、ボイド率の増加とともに、ベンド内の流れ方向の変化に対応して、 C_d はそれぞれ複雑にばらつき、定まらない。したがって、180°ベンド流量計を用いる場合、気液二相流時では流量計としての機能の低下することが確かめられた。
- 3) 写真観察によって気相の流動は、ベンド入口で液相に働く遠心力の影響を受け、出口近くで気相に働く浮力の影響を受ける。

参 考 文 献

- (1) Jacobs, G. S. and Sooy, F. A., New Method of Water Measurement by Use of Elbows in a Pipe Line, J. Electr. Power Gas, 27 (1911), 72.
- (2) 村上・ほか 3 名, エルボ流量計の研究, 機論, 43-372, 第 2 部 (1977), 3037.
- (3) 小栗, 90°エルボ流量計, 中部工業大学紀要, 11-A (1975), 23.
- (4) 小栗, エルボ流量計, 流体工学, 14-6 (1978), 317.
- (5) 小栗, 180°ベンド流量計, 機論, 53-496, B (1987), 3655.
- (6) 伊藤・宮川, 360°ベンド流量計の流量係数, 機論, 43-376, 第 2 部 (1977), 4562.
- (7) 伊藤・ほか 2 名, 180°ベンド流量計の流量係数, 東北大学高速力学研究所報告, 47-409 (1981), 1.
- (8) 伊藤・ほか 4 名, 90°ベンド流量計の流量係数, 東北大学高速力学研究所報告, 50-432 (1983), 61.
- (9) 渡辺・ほか 3 名, らせん管内気液二相流の流動と伝熱, 機論, 62-476, B (1986), 1857.
- (10) Hoang, K. and Davis, M.R., Trans. ASME, J. of Fluid Engng., 106-1 (1984), 30.
- (11) 菊山・ほか 3 名, 曲がり管路における気液二相流, 混相流シンポジウム'90 (第 9 回) 講演論文集, (1990), 81.
- (12) Lansford, W. M., The Use of an Elbow in a Pipeline for Determining the Rate of Flow in the Pipe, Bull. Univ. Illinois, Eng. Exp. Station, No. 289 (1936), 1.