

欠円状くさび形絞り流量計における気液二相流の特性

水谷 正和*, 小栗 幸正*, 宇陀 秀明**

Characteristics of Gas-Liquid Two-Phase Flow
in a Segmental Wedge Flowmeter

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

(Received May 31, 1995)

This paper describes experimental results of a gas-liquid two-phase flow in a segmental wedge flowmeter. The shape of the contractor wedges employed was an equilateral triangle, and their heights, z , are approximately 0.3, 0.4 and 0.5 times the inner diameter of the flowmeter, respectively.

The present objective is to investigate experimentally the effect of the flow direction of flowmeter, the void fraction, and Reynolds number on discharge and pressure coefficients.

1. まえがき

近年, 工業の発達に伴ってボイラーの蒸発管, ブロー管, 復水器, 冷却器の蒸発管, 化学機械の接触反応装置, 加圧型原子炉などの管内を流れる流体は, 気体と液体が混合した気液二相流である場合が多く見られ, 加圧型原子炉においては1次冷却材喪失事故が発生している。この事故対策を含め, 気液二相流は流れを支配する要素が非常に多く, 複雑で多様な流れ形態を持っている。したがって, その流動機構を解明することは重要な課題である。気液二相流の流動に対し, 初期には Petrick⁽¹⁾によって, γ 線透過法を用いたボイド率分布の測定があり, Neal⁽²⁾や小出ら⁽³⁾の探針法を用いた報告があるが, それらの測定精度に問題があった。飯田ら⁽⁴⁾は探針法の計測法を改良して精度の高い測定を行い, 気泡流では, 管壁近傍にボイド率の頂点が存在することを, 瀬古口ら⁽⁵⁾は気泡寸法分布を測定して, 気泡の大きさが気泡分布に影響を与えることを, 井上ら⁽⁶⁾は気相と液相の速度, ボイド率などの分布を同時測定し, 気液間の滑り速度の存在が

速度分布の平坦化を促していることを明らかにした。

これらの研究は, 微視的な二相流の流動機構を明らかにしようとするものであるが, 工業上重要なことは気相と液相および全流量の正確な測定法の確立にあり, 気液二相流における流量計の測定に関する研究は, 90°ベンド流量計について菊山ら⁽⁷⁾, オリフィスについて佐田富ら⁽⁸⁾によって報告されている。

本研究の欠円状くさび形絞り流量計は, 円管内に断面が正三角形状くさび形の絞りを欠円状(弓状)に設け, 絞り前後の壁圧ヘッド差を利用して流量を測定する絞り流量計で, 小栗⁽⁹⁾は単相流における特性を報告している。この流量計は絞り部が半円状に開口しているので, きょう雑物や気体を含む流れ, すなわち混相流に使用できる長所がある。本研究は, この流量計を垂直方向と水平方向に設置し, 水の中に空気を混入させた気液二相流時における圧力係数や流量係数への影響を実験的に調べ, 単相流の場合と比較検討した。実験は後で述べる水のみかけのレイノルズ数 $Re = (2 \sim 10) \times 10^4$ の乱流域において, ボイド率 α を (0~30) % と変えて行った。

*機械工学科(Department of Mechanical Engineering)

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

2. 記号

本論文に用いた主な記号を下に示す。

- A : 管の断面積
 C_d : 流量係数
 C_p : 壁面圧力係数
 d : 管の内径
 g : 重力加速度
 H_E : 基準断面 E の壁圧ヘッド
 H_i : 各測圧孔の壁圧ヘッド
 ΔH_d : 絞り前後の差圧ヘッド
 ΔH_f : 基準断面 E から壁面圧力測定孔 a_6 までの差圧ヘッド
 ΔH : 基準圧力断面 E から各壁面圧力測定孔までの差圧ヘッド
 L_i : 基準断面 E から各測圧孔までの管軸長さ
 Q : 気液二相流の流量
 Q_a : 空気流量
 Q_w : 水の流量
 Re_w : 水のレイノルズ数
 S : 欠円状絞り部の流路開口面積
 V_m : 管内の平均流速
 V_w : 水の平均速度
 z : 絞り最大高さ
 α : ボイド率
 β^2 : 欠円状オリフィスの絞り面積比
 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_a : 空気の密度
 ρ_w : 水の密度
 ϕ : 欠円状絞り部の中心角
 添字
 U : 絞り部の上流側
 D : 絞り部の下流側

3. 実験装置と方法

3.1 実験装置の概要

本研究に使用した実験装置(垂直接流)の概要を図 1 に示す。地下水槽から揚水ポンプ①で高さ約 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り、流量調節弁④で流量を調節された後、空気取り入れ口⑤より空気が混入されて二相流となる。この二相流は、整流格子⑥、上流側直管⑦(内径 $d_0=50.02\text{mm}$, 長さ $l_0=1.02\text{m}$ のアクリル製円管)を通して欠円状くさび形絞り流量計⑧に流入する。そして下流側直管⑨(内径 $d_0=50.02\text{mm}$, 長さ $l_0=0.50\text{m}$ のアクリル製円管)を通して秤量タンク⑩

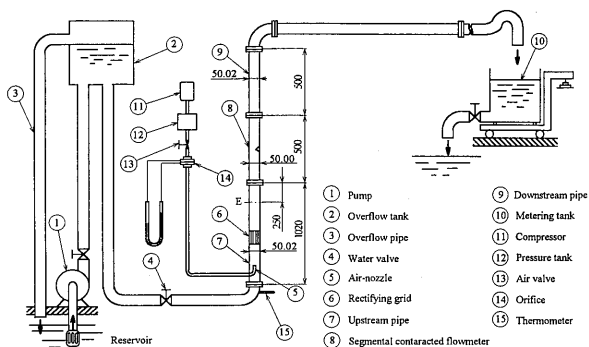


図 1 実験装置の概要 (垂直方向流れ)

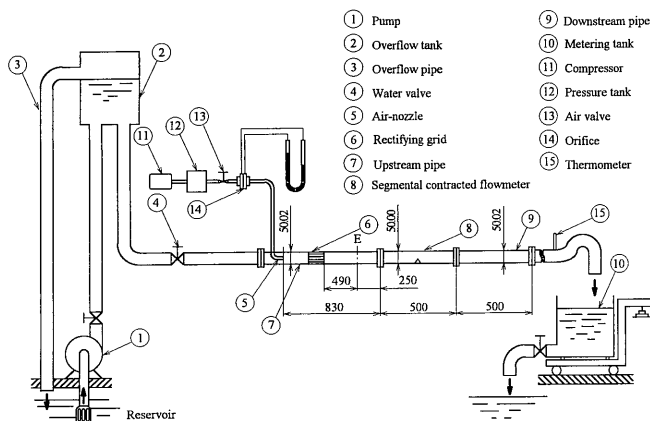


図 2 実験装置の概要 (水平方向流れ)

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、空気流量測定用オリフィス⑭を経て空気取り入れ口に導かれる。欠円状くさび形絞り流量計、上流側直管、下流側直管の各壁圧測定孔 (孔径 0.8mm) からの壁圧ヘッドは逆 U 字多管水マノメータに導かれ、精度 1/100mm のカセットメータで測定した。空気流量測定用オリフィスの差圧ヘッドは U 字マノメータに導びかれ、メジャーで 1/10mm まで測定した。水温は実験のつど温度計⑮により測定した。次に水平流れの実験装置の概要を図 2 に示す。実験の要領は垂直接流の場合と同様である。

3.2 欠円状くさびと壁圧測定

本研究に用いた欠円状くさび形絞り部の概略を図 3 に示す。このくさび形絞り部は黄銅製で透明アクリル製円管の中央断面に図のように欠円状に設置した。くさびの断面形状は正三角形とし、その表面は十分滑らかに磨き、頂点は鋭く仕上げてある。くさびの最大高さ z と、管内

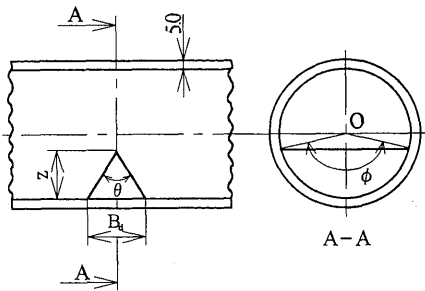


図3 欠円状くさび形絞り

た。

$$C_p = \lambda \frac{L_i}{d} - \frac{\Delta H}{V_m^2 / (2g)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

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、 V_m は管内平均流速、 ΔH 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、流量計の設置条件により次式で求められる。

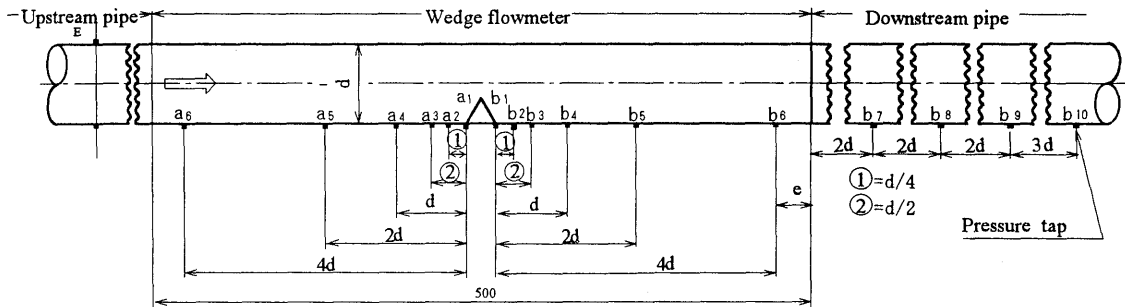


図4 供試流量計と壁圧測定位置

表1 欠円状くさびの寸法

Dimensions						
No.	z mm	z/d	β^2	Bd mm	θ°	e mm
A	14.94	0.299	0.749	17.21	59.88	0.83d
B	20.00	0.400	0.626	22.94	59.67	0.77d
C	25.15	0.503	0.496	29.02	59.96	0.71d

径 d との比 z/d 、すなわち、最大絞り高さ比の値は、表1のように約 0.3, 0.4, 0.5 とした。この場合、欠円状絞り部の開口面積 S と円形流路断面積 A との比を表す絞り面積比 β^2 は約 0.75, 0.63, 0.50 になる。

図4は、欠円状くさび形絞り部の上流側と下流側直管に設けた壁圧測定孔（孔径 0.8mm）の位置を示したもので、流量計入口より上流側 $5d$ の位置に基準断面 E を設けて基準壁圧ヘッドとし、絞り部上流側に $a_1 \sim a_6$ の6箇所、下流側に $b_1 \sim b_{10}$ の10箇所である。したがって、壁圧測定孔は、基準断面 E から絞り部直前の a_1 まで6箇所、絞り部直後の b_1 から下流側に10箇所、合計16箇所の位置に設けられ、各壁圧ヘッドを多管水マノメータに導き、精度 1/100 のカセットメータで読みとった。

4. 実験結果と考察

4.1 圧力分布

欠円状くさび形絞りによる管路の壁圧分布状況を調べるため、次式で定義される無次元値の圧力係数 C_p を用い

$$\text{垂直: } \Delta H = (H_E - H_i) \frac{\rho_w}{\rho} + \frac{Q_a}{Q_w} L_i \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{水平: } \Delta H = (H_E - H_i) \frac{\rho_w}{\rho} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 ρ_w は水の密度、 ρ は二相流の平均密度である。管摩擦係数 λ は次式で定義した。

$$\lambda = \frac{d}{L_i} \frac{\Delta H^*}{(V_m^2 / 2g)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 ΔH^* は設置条件により次式で求められる。

$$\text{垂直: } \Delta H^* = \Delta H_i \frac{\rho_w}{\rho} + \frac{Q_a}{Q_w} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{水平: } \Delta H^* = \Delta H_i \frac{\rho_w}{\rho} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 ΔH_i は基準断面 E から壁面圧力測定孔 a_6 までの差圧ヘッドである。

図5、図6は前述の図1のように実験装置の流量計の流れ方向を垂直に設置し、レイノルズ数 Re を 5×10^4 と 9×10^4 の大きさにおける各圧力係数 C_p の分布を示す。両図の横軸は、絞り前端の測圧点 a_1 と後端の測圧点 b_1 を基準として、上流側と下流側への各 l_i/d の測圧点にお

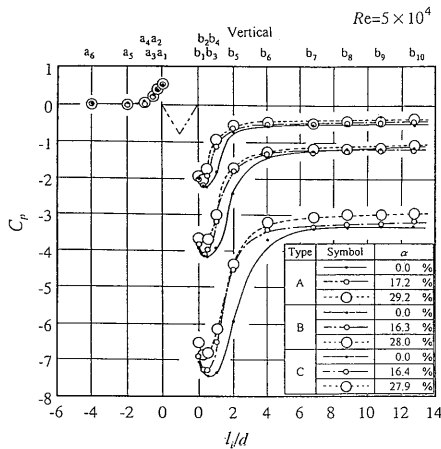


図5 欠円状絞り前後の圧力分布 (垂直方向流れ)

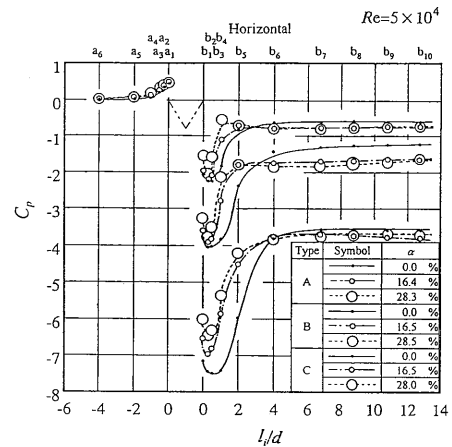


図7 欠円状絞り前後の圧力分布 (水平方向流れ)

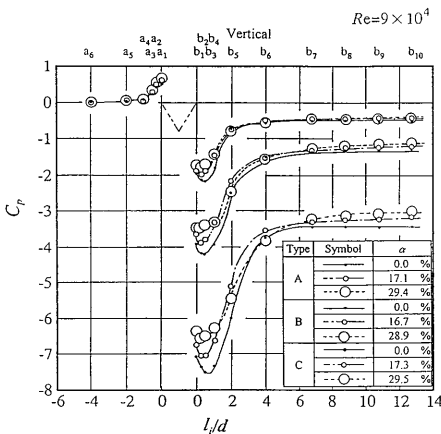


図6 欠円状絞り前後の圧力分布 (垂直方向流れ)

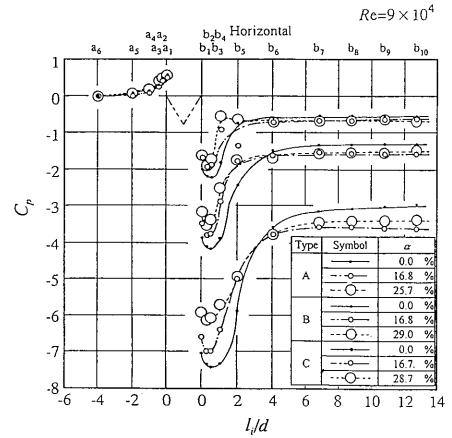


図8 欠円状絞り前後の圧力分布 (水平方向流れ)

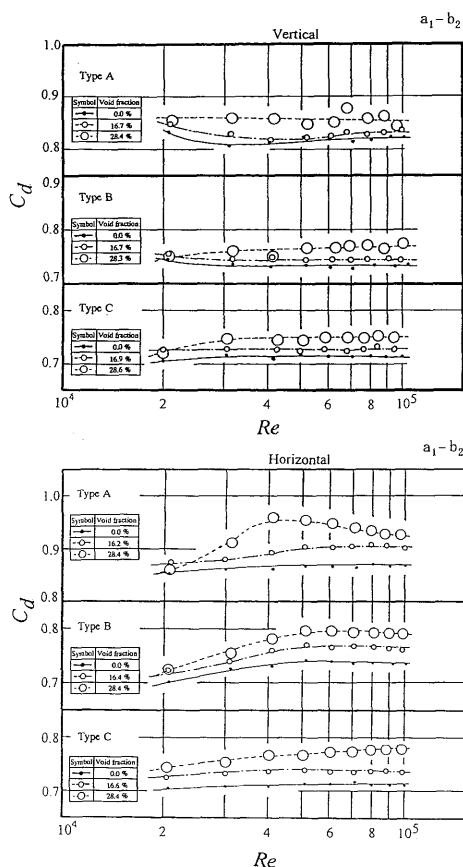
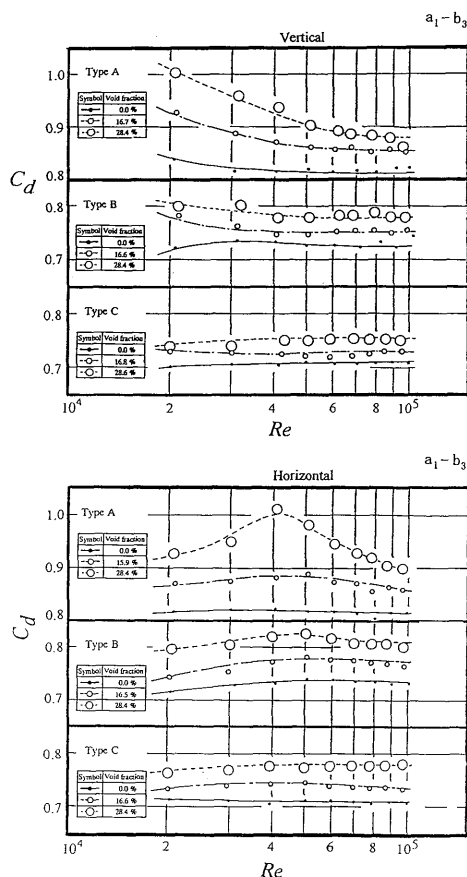
る C_p との関係を示す。この場合、ボイド率 α を図中の表のように約 (0~30) % に変化させ、最大絞り高さ比 z/d を約 0.3 (タイプ A), 0.4 (タイプ B), 0.5 (タイプ C) における C_p の変化を明らかにした。

図より、絞り部上流側の C_p 分布は表1の絞り面積比 β^2 とボイド率 α の大小に関係なくほぼ同様に变化する。一方、絞り部下流側では、 C_p の値が大きく変化し、 β^2 とボイド率 α の影響が顕著である。すなわち、 β^2 の値の減少 (くさび高さ z の増大) に伴って C_p は小さくなる。また、測圧点の位置による C_p の変化をみると、絞り後端の測圧点 b_1 で C_p は急減し、測圧点 b_3 付近でさらに減少して極小になる。その後 C_p は急増し、ついで測圧点 $b_5 \sim b_6$ あたりでゆるやかな増加をたどり、一定値に収束する傾向がみられる。また、絞り最大高さ比 z/d が同一の場合、 C_p の値はボイド率 α の大小に影響され、 α の増大

に伴って C_p の値は大きくなる傾向を示す。

図7, 図8は、流量計の流れ方向を水平に変えて実験を行った結果で、他の実験条件は垂直流れの場合とほぼ同一にした。絞り前後の C_p 分布曲線は測圧点 $b_5 \sim b_6$ あたりまで前者の垂直流れの場合とほぼ類似の傾向を示す。しかし、 $b_5 \sim b_6$ 点下流ではボイド率 α の増加に伴って C_p は逆に減少する傾向を示し、この流量計の垂直流れと水平流れにおける気液二相流の特性が確かめられた。

絞り流量計として望ましいことは、絞り前後の差圧ヘッド ΔH_d ができるだけ大きいことである。したがって、 ΔH_d を求める測圧点の位置は、絞り前方では $a_1 \sim a_2$ の範囲、絞り後方では $b_2 \sim b_3$ の範囲に設けることが最適であり、適切な測圧点の組合せは、 $a_1 \sim b_2$, $a_1 \sim b_3$, $a_2 \sim b_2$, $a_2 \sim b_3$ の4組となる。また、最大絞り高さ比 z/d は0.5が最適である。ボイド率 α の大小に対し、 $\alpha \leq 30$


図 9 C_d と Re の関係 ($a_1 \sim b_2$)

図 10 C_d と Re の関係 ($a_1 \sim b_3$)

%では比較的に影響は少ないと思われる。

4.2 流量係数

欠円状くさび形絞り流量計の流量係数 C_d は次式で定義される。

$$C_d = \sqrt{1 - \alpha} \frac{Q_w + Q_a}{\sqrt{2g\Delta H_d S}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 S は絞り部の開口面積で、次式より求められる。

$$S = d^2 (2\pi - \phi + \sin \phi) / 8 \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中の ϕ は、絞り部欠円の中心角 (図 3 参照) で、次式で与えられる。

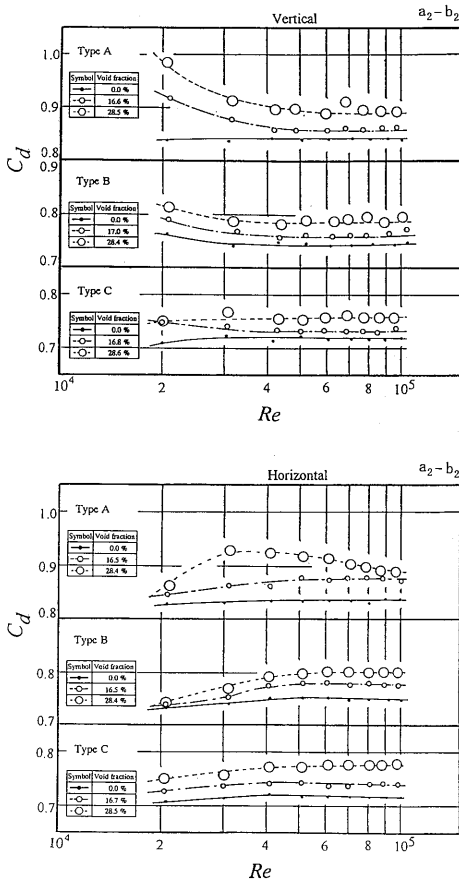
$$\phi = 2\cos^{-1} (1 - 2z/d) \quad \dots\dots\dots (9)$$

この場合、絞り面積比 β^2 は次式で表される。

$$\beta^2 = 1 - (\phi - \sin \phi) / (2\pi) \quad \dots\dots\dots (10)$$

図 9～図 12 において上方は流量計の流れ方向が垂直の場合、下方は水平の場合における流量係数 C_d とレイノルズ数 Re の関係を示す。

全般的にみて、まずボイド率 $\alpha = 0$ の場合、 C_d 曲線はほぼ水平状の一定値に収束する傾向を示すが、 α が約 16.8%、28.5% と増加すると、 C_d 曲線は流量計の流れ方向による影響が顕著になる。すなわち、流量計の流れ方向が前者の場合、 C_d 曲線は右下がりの傾向が現れ、タイプ C とタイプ B の絞り部では $Re \geq 4 \times 10^4$ で C_d はほぼ水平状になるがタイプ A では一定値への収束は不十分である。一方、流量計の流れ方向が後者の場合、 α の増大に伴って C_d 曲線はほぼ右上がりの傾向を示しタイプ C とタイプ B では $Re \geq 5 \times 10^4$ で C_d はほぼ水平状になるが、タイプ A では C_d 曲線が山なりの傾向となり一定値への収束は困難である。なお、4 通りの測圧点の組合せによる結果への影響はほぼ類似し、差はみられなかった。

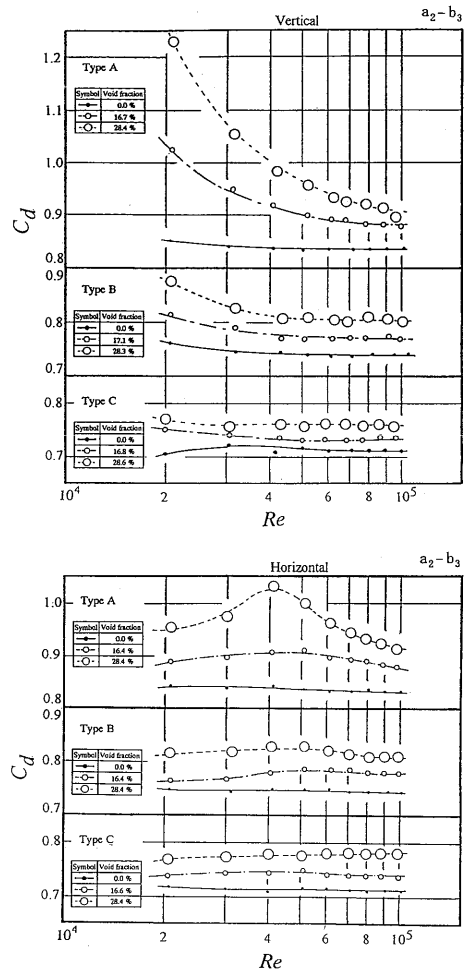
図 11 C_d と Re の関係 ($a_2 \sim b_2$)

したがって、流量計として使用する場合、ボイド率 α は 15% 以下、絞り部はタイプ C が適切、ついでタイプ B となりタイプ A の場合は単相流 ($\alpha=0$) の場合のみと推測される。

5. 結 論

欠円状くさび形絞り流量計の最大絞り高さ比 z/d を約 0.3, 0.4, 0.5 したがって絞り面積比 β^2 を約 0.75, 0.63, 0.50 と変え、ボイド率 $\alpha=(0, 16.8, 28.5)\%$ 、見かけの水のレイノルズ数 Re が $2.0 \times 10^4 \leq Re \leq 1 \times 10^5$ の乱流域で、流量計の流れ方向が垂直と水平の場合に対して実験を行い、次の結論を得た。

- 1) 流量測定に際し、欠円状くさび形絞り前後の差圧ヘッドを取り出す壁圧測定孔の位置は、絞り前方では $(0 \sim 1/4)d$ 、絞り後方では $(1/4 \sim 1/2)d$ の範囲に設けるのが適切である。
- 2) 気液二相流時における流量計の流れ方向を、垂直方向と水平方向に変えた場合、絞り後方 $(2 \sim 4)d$ の位置で、垂直流れの圧力係数 C_p 曲線と水平流れの C_p 曲線が、

図 12 C_d と Re の関係 ($a_2 \sim b_3$)

単相流の C_p 曲線をはさんで交差し、前者の C_p 曲線は上方に、後者の C_p 曲線は下方の配置になった。

- 3) 本研究の流量計を気液二相流時に用いる場合、ボイド率 α は 15% までとし、絞り部はタイプ C、ついでタイプ B が適切和思考される。

参 考 文 献

- (1) Petrick, M., ANL-5787 (1958).
- (2) Neal, L. G., ANL-5787 (1963).
- (3) 小出・久保田, 化学工学, **35**-9 (1964), 806.
- (4) 飯田・ほか 2 名, 日本原子力学会誌, **9**-1 (1967).
- (5) 世古口・ほか 2 名, 気泡流の研究 (第 1 報, 垂直上昇流における疎な気ほう群について), 機論, **40**-333 (昭 49), 1395.
- (6) 井上・ほか 3 名, 垂直管内気ほう流の気体体積率および気・液流速の分布, 機論, **42**-360 (昭 51), 2521.

- (7) 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, (1990-7), 81.
- (8) 佐田富・ほか 2 名, 機論, 55-509, B (1989), 30.
- (9) 小栗, くさび形絞り流量計の研究, 機論, 53-495, B (1987), 3257.