

気液二相流時における欠円状オリフィスの特性

水谷 正和*, 吉安 雅明**

Characteristics of a Segmental Orifice for Gas-Liquid Two-Phase Flow

Masakazu MIZUTANI* and Masaaki YOSHIYASU**

(Received May 28, 1996)

This paper describes the experimental results of a gas-liquid two-phase flow in a segmental orifice. The experiments were carried out at three opening area ratios from 0.50 to 0.75 and over the range of the diametral Reynolds number of $Re = (2 \sim 10) \times 10^4$, and also the gas-liquid volumetric flow ratio less than 0.3.

The present experimental data show that the segmental orifice has sufficient accuracy for practical applications.

Keywords : gas-liquid two-phase flow, segmental orifice, reynolds number, volumetric flow ratio

1. まえがき

欠円状絞り流量計の研究は、秋葉¹⁾によってきょう雑物を含む流量測定用としてくさび形絞りが紹介され、Beitlersら²⁾によって欠円状オリフィスについて行われている。しかし、これらは実用面で流量係数とレイノルズ数との関係のデータが不十分であった。小栗^{3~5)}は、短い円管内にくさびを欠円状(弓形)に設けたくさび形流量計や、これと類似な欠円状絞り流量計の特性について、実用面に対し詳細な結果を報告している。これらの研究は、流体として単相流(液体)である。しかし、最近ボイラーの蒸発管、冷却器の蒸発管、加圧式原子炉などの管内に見られる流動様式が複雑化し、液体中に気体が混入した気液二相流、すなわち混相流が多く見られる。したがって、その流動機構を解明する流量測定法の確立は重要な課題である。著者の一人は、円管内に断面が正三角形形状のくさびを設けた欠円状くさび形絞り流量計に対

して、気液二相流時における圧力係数や流量係数への影響を明らかにした⁶⁾。しかし、流量測定に用いる流量計は、製作が簡単で一般化することが重要であることから著者らは、従来から流量計として用いられているオリフィス形状の流量計を半割れに切断した欠円状オリフィスについて研究した。

本研究の流量計は、混相流に対処できる欠円状オリフィス、すなわち円管内に断面が欠円状(弓形)で絞りの端面をオリフィス状に加工した欠円状オリフィスを設け、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ある。

本研究は、この流量計を水平に設置し、最大絞り高さを3通りに変化させて、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、流量係数など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、水のみかけのレイノルズ数 $Re = (2 \sim 10) \times 10^4$ の乱流域において流量比、すなわち水と空気の流量の割合 $\alpha = (0 \sim 30) \%$ 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以下に示す。

- A : 管の流路断面積
 C_d : 流量係数
 C_p : 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
 h : 基準断面 E から壁面圧力測定孔 a_5 までの差圧ヘッド
 ΔH : 基準断面 E から各測圧孔までの差圧ヘッド
 ΔH_d : オリフィス前後の差圧ヘッド
 L : オリフィス前端と後端を基点とした上流側と下流側への距離
 L_i : 距離断面 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 : 空気の流量
 Q_w : 水の流量
 Re : 水のみかけのレイノルズ数
 S : 欠円状オリフィス部の流路開口面積
 V_a : 空気の平均速度
 V_m : 管内の平均速度
 V_w : 水の平均速度
 z : 絞り最大高さ
 α : 流量比
 β^2 : 欠円状オリフィスの絞り面積比
 λ : 管摩擦係数
 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

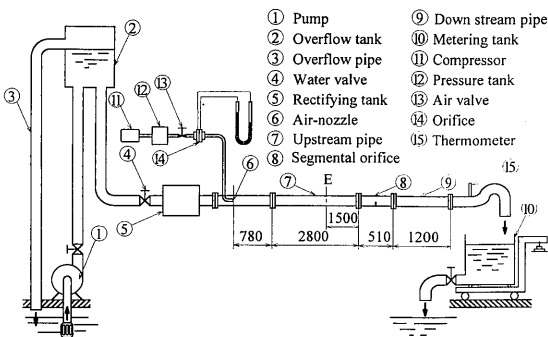


図1 実験装置の概要

3. 実験装置と方法

3.1 実験装置の概要

本実験に使用した実験装置の概要を図1に示す。地下水槽から揚水ポンプ①によって高さ約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で流量を調節され整流タンク⑤に入り、ここで流れは整流された後、空気取り入れ口⑥より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 $d_u=50.01\text{mm}$, 長さ $l_u=2.8\text{m}$ の黄銅製円管)を通して欠円状オリフィス⑧に流入する。そして、下流側直管⑨(内径 $d_b=50.01\text{mm}$, 長さ $l_b=1.2\text{m}$ の黄銅製円管)を通して秤量タンク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、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。欠円状オリフィス、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字多管マンオメータに導かれ、精度1/100mmのカセットメータで測定した。空気流量用オリフィスの差圧ヘッドはU字マンオメータに導かれ、メジャーで1/10mmまで測定した。

3.2 欠円状オリフィスと壁圧測定

本研究に用いた欠円状オリフィスの概要を図2に示す。この欠円状オリフィス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黄銅製平板(厚さ3mm)の欠

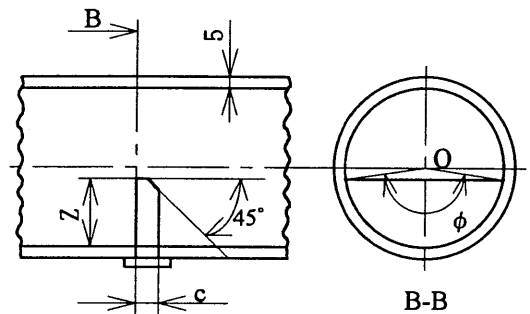


図2 欠円状オリフィスの概要

表1 欠円状オリフィスの寸法

Dimensions					
Type	z mm	z/d	ϕ°	β^2	e mm
I	24.97	0.498	179.6	0.502	256
II	19.98	0.398	156.6	0.631	250
III	14.85	0.297	132.0	0.752	250

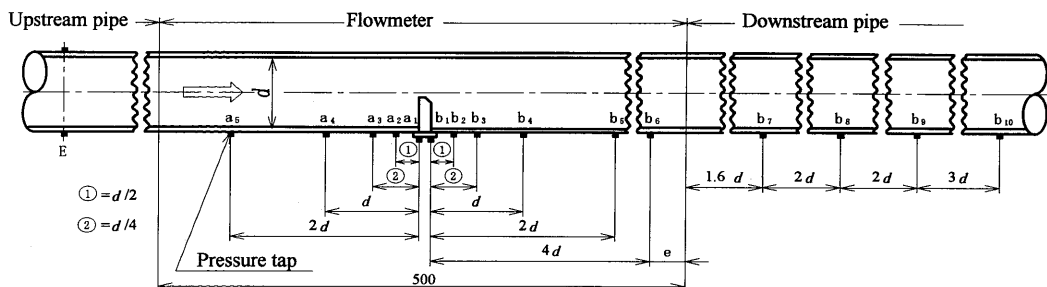


図3 供試流量計と壁圧測定位置

円状絞りを設置した。絞りの端面形状はオリフィス状で、その表面は十分に滑らかに磨いて仕上げてある。オリフィスの最大高さ z と管内径 d との比 z/d の値は、約 0.3, 0.4, 0.5 にした。したがって、絞り部開口面積 S と流路断面積 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。欠円状オリフィスの主要寸法を表 1 に示す。

図 3 は、欠円状オリフィスの流路に沿った壁圧変化を調べるため、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 $30d$ の位置に基準断面 E を設けて基準壁圧ヘッドとし、オリフィス上流側に $a_1 \sim a_5$ の 5 箇所、下流側に $b_1 \sim b_{10}$ の 10 箇所である。

4. 実験結果と考察

4.1 圧力分布

欠円状オリフィス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 を用いた。

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

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、 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、次式で求められる。

$$\Delta H = (H_E - H_i) \frac{\rho_w}{\rho} \quad (2)$$

ただし、 ρ_w は水の密度、 ρ は気液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。

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

ここで、 h は次式で求められる。

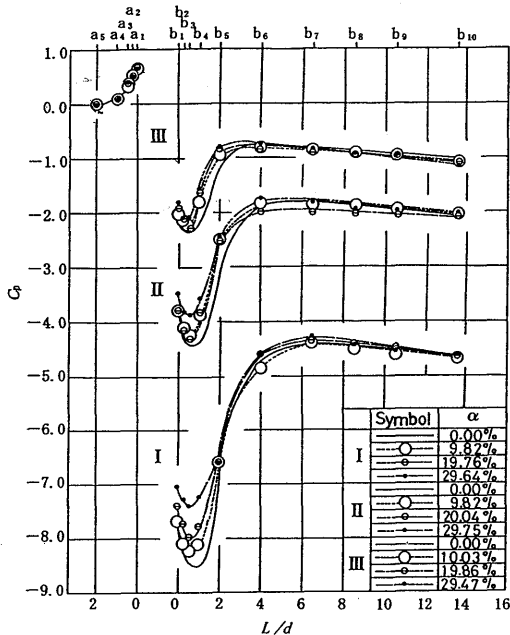
$$h = (H_E - H_i) \frac{\rho_w}{\rho} \quad (4)$$

図 4 は欠円状オリフィスに対して、圧力係数 C_p とオリフィス前端と後端を基点とした上流側と下流側への距離 L/d の関係を最大絞り高さ比 z/d について水と空気の流量比 α の値と対応して示し、図 4 (a) は、レイノルズ数 $Re = 5.0 \times 10^4$ の場合、図 4 (b) は $Re = 10.0 \times 10^4$ の場合である。流量比 α を図中の表のように約 (0~30) % に変化させて、最大絞り高さ比 z/d を約 0.5 (タイプ I) 0.4 (タイプ II) 0.3 (タイプ III) における C_p の変化を明らかにした。図より両者の C_p 曲線の変化は、 Re の大小にかかわらずほぼ類似の傾向を示す。しかし、 z/d の大小による C_p への影響は著しかった。

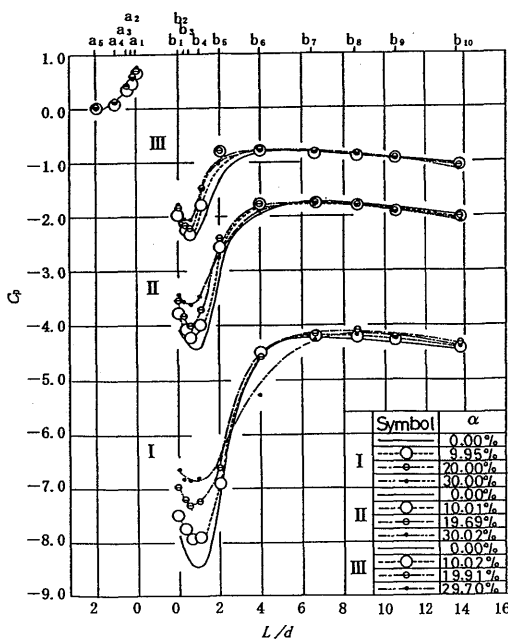
オリフィスの上流側の C_p 分布は、最大絞り高さ比 z/d と図中の流量比 α の大小に関係なくほぼ同様に变化する。オリフィス下流側では C_p の値が大きく変化し、 z/d と流量比 α の影響が顕著である。すなわち、最大絞り高さ比の増大に伴って C_p は小さくなる。また、測圧点の位置による C_p の変化をみると、オリフィス後端の測圧点 b_1 で C_p 値は急減し、測圧点 b_3 付近で極小になる。その後 C_p 値は急増し、測圧点 $b_5 \sim b_7$ にかけてゆるやかな増加となり、測圧点 b_7 以降では漸減する傾向を示し、その後一定値へと収束するものと推測される。また、絞り最大高さ比 z/d が同一の場合、 C_p 値は、流量比 α の増加に伴って測圧点 b_3 付近の極小が大きくなり、測圧点 $b_5 \sim b_6$ の間で反転する傾向が確かめられた。

絞り流量計の測定精度向上の面から考察すれば、絞り流量計の望ましい要因として、絞り前後の差圧ヘッド ΔH_d が大きく安定していることがあげられる。したがって、図 4 より ΔH_d を求める測圧点の位置は、オリフィス前方では $a_1 \sim a_2$ の範囲、オリフィス後方では $b_2 \sim b_3$ の範囲に設けることが最適で、本研究では、後述する流量係数 C_d の検討に対して測圧点の組み合わせ条件を $a_1 \sim b_2$, $a_1 \sim a_3$, $a_2 \sim b_2$, $a_2 \sim b_3$ の 4 組の絞り前後の差圧ヘッド ΔH_d を用いることにした。また、最大絞り高さ比 z/d は

Re の大小に関わらず絞り前後の差圧ヘッド ΔH_d が最も大きく得られる 0.5 が最適であり, 空気と水の流量比 α の大小に対して $\alpha \leq 30\%$ で測定法に与える影響は, 比較的少ない。



(a) $Re=5.0 \times 10^4$



(b) $Re=10.0 \times 10^4$

図4 欠円状オリフィス前後の圧力分布

4.2 流量係数

欠円状オリフィスの流量係数 C_d は次式で定義される。

$$C_d = \sqrt{1 - \alpha} \frac{Q_w + Q_a}{\sqrt{2g\Delta H_d S}} \quad (5)$$

ここで, S はオリフィスの開口面積で, 次式より求められる。

$$S = d^2(2\pi - \phi + \sin\phi)/8 \quad (6)$$

式(6)中の ϕ は欠円状オリフィスの中心角 (図2参照) で, 次式で与えられる。

$$\phi = 2\cos^{-1}(1 - 2z/d) \quad (7)$$

よって, オリフィスの絞り面積比 β^2 は次式で表される。

$$\beta^2 = 1 - (\phi - \sin\phi)/(2\pi) \quad (8)$$

図5~8は, オリフィス前後の最適な差圧ヘッド ΔH_d の4組の組合わせ, a_1-b_2 , a_1-b_3 , a_2-b_2 , a_2-b_3 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, まず気液二相流の流量比 $\alpha=0$ について 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 9.58%, 19.32%, 29.07% と増加すると, C_d 曲線は α の増大に伴いほぼ右上がりの傾向を示し, タイプ I, II では, $Re \geq 6 \times 10^4$ で C_d 曲線は, ほぼ一定値に収束するがタイプ III は, 山なりの傾向となり一定値への収束はしない。次にタイプ I, II において α が増加するに従って C_d の値は, 若干大きい値を示し一定値に収束する。しかし, タイプ III の C_d 曲線は α の増加に依存せず山なりの傾向を示す。その顕著な傾向として, 図8にみられる二相流の C_d 曲線が単相流時(実線)の C_d 曲線よりも小さい値を示している。また, 4組の測圧点の組合わせによる結果の影響は, ほぼ類似し差はみられなかった。したがって, 流量計として使用する場合, 流量比 α は 30% 以下で欠円状オリフィスはタイプ I が最適で, ついでタイプ II となり, タイプ III は $\alpha=0\%$ (単相流) の場合のみと推測される。

4.3 管摩擦係数の影響

気液二相流時のレイノルズ数の大小による管摩擦係数に与える影響を調べた。図9は, 式(3)によって求めた気液二相流時の管摩擦係数 λ と空気と水の流量比 α の関係を最大絞り高さ比 z/d (タイプ I, II, III) について, レイノルズ数 $Re=5.4 \times 10^4$ と $Re=10.0 \times 10^4$ の場合

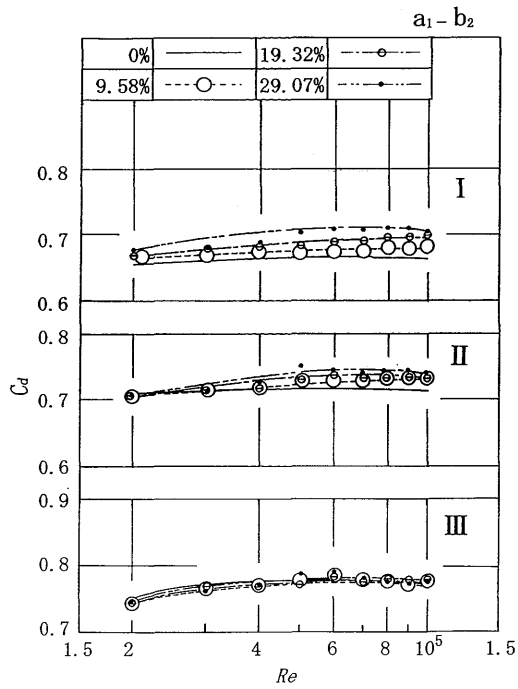


図5 C_d と Re の関係 (a_1-b_2)

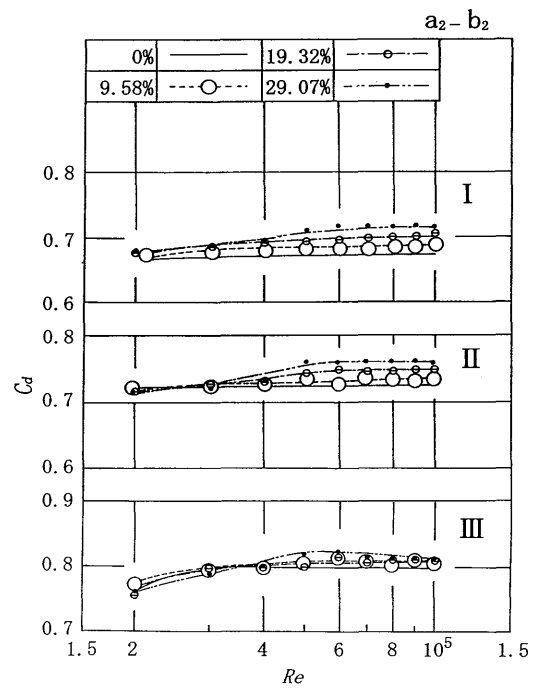


図7 C_d と Re の関係 (a_2-b_2)

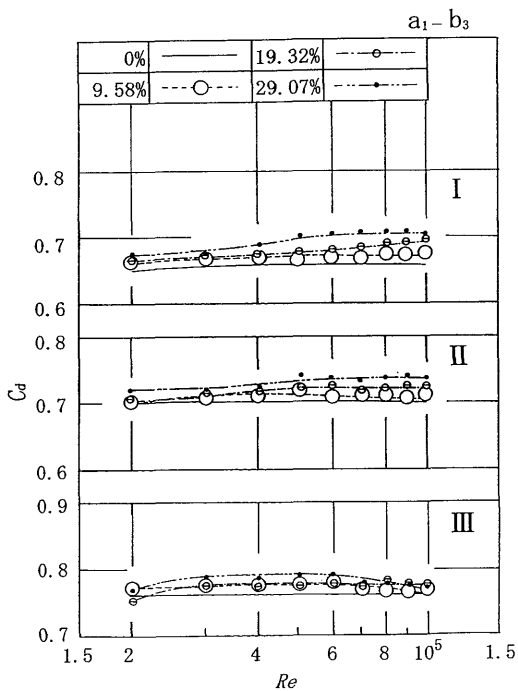


図6 C_d と Re の関係 (a_1-b_3)

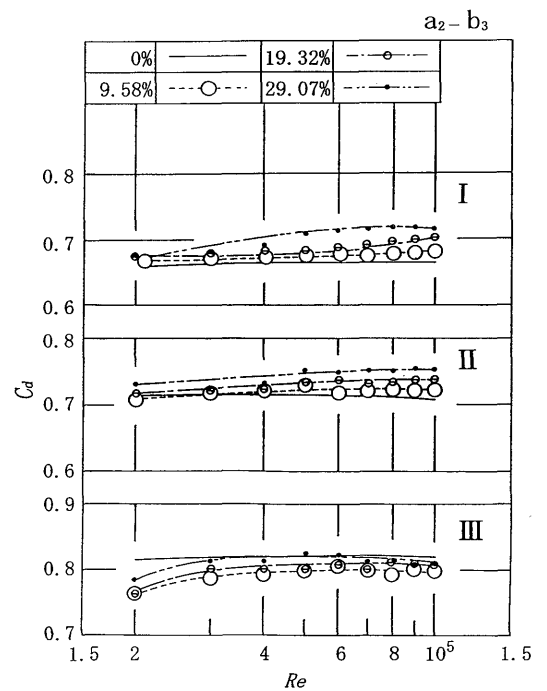


図8 C_d と Re の関係 (a_2-b_3)

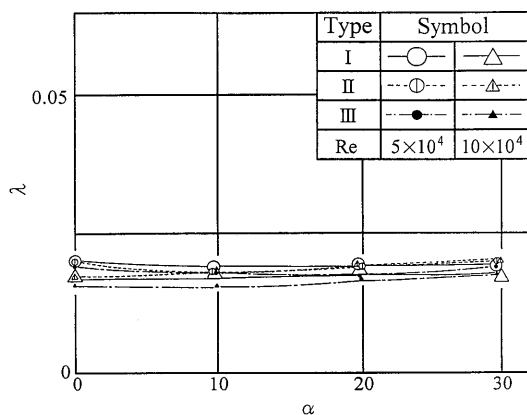


図9 λとαの関係(気液二相流)

と対応して示してある。図より管摩擦係数 λ は、流量比 α の増加に伴ってタイプ I, II, III とともに、ほぼ水平状の一定値を示している。レイノルズ数 Re の大小の差異による λ の値は、レイノルズ数の大きい $Re=10 \times 10^4$ の方が若干小さい値を示している。しかし、その差はわずかで本研究の気液二相流時の管摩擦係数に与える影響はないと考えてよい。

5. 結論

欠円状オリフィスの流量計の最大絞り高さ比 z/d を約 0.5, 0.4, 0.3 すなわち、絞り面積比 β^2 を約 0.50, 0.63, 0.75 と変え、水と空気の流量比 $\alpha \equiv (0, 10, 20, 30) \%$ 、水のみかけのレイノルズ数 Re が $2.0 \times 10^4 \leq Re \leq 1 \times 10^5$ の乱流域で実験を行い、次の結論を得た。

- 1) 流量測定において、欠円状オリフィス前後の差圧ヘッドを取り出す壁圧測定孔の位置は、オリフィス前方では $(0 \sim 1/4) d$ 、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) 気液二相流時の流量測定に欠円状オリフィスを用いる場合、水と空気の流量比は $\alpha \leq 30 \%$ とし、オリフィスのタイプはタイプ I、ついでタイプ II が適切と思われる。
- 3) 管摩擦係数 λ は、欠円状オリフィスの最大絞り高さ比 z/d の大小とレイノルズ数 Re の大小に関わりなくほぼ水平状に一定値となる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始ご懇切なるご指導賜りました前本学機械工学科小栗幸正教授に対し、深甚の謝意を表します。また、実験に協力された本学機械工学科卒業研究生名古屋和弘、西澤修作、桃井利彦、山川友征、前田康晴の諸君に心からの御礼を表します。

参 考 文 献

- 1) 秋葉, 機習教 (関西支部), (昭37-11), 49.
- 2) Beitler, S. R. and Maaon, D. J., Trans. ASME, Vol. 71 (1941-11), 751-756.
- 3) 小栗, 機論, 53-495, B (1987), 3257.
- 4) 小栗, 機論, 57-536, B (1991), 1284.
- 5) Oguri, Y., Proceedings of the Symp. on Mass Flow Measurement, ASME (1988-11), Chicago.
- 6) 水谷・小栗・宇陀, 中部大学工学部紀要, 第31巻, (1995-12), 23.