中粒子固液二相流の流量・濃度のベンチュリ管による計測*

平田 泰茂^{*1}, 高野 正之^{*1}, 奈良坂 力^{*2}

Measurements of Flow Rates and Particle Concentrations in Heterogeneous Solid-Liquid Two-Phase Flows by Means of a Venturitube

Yasushige HIRATA, Masayuki TAKANO, and Tsutomu NARASAKA

In order to establish an accurate method of measuring flow rates and particle concentrations in heterogeneous solid-liquid two-phase flows, the discharge coefficients of a typical Hershel-type Venturitube in both horizontal and vertical pipe arrangements were carefully investigated for six different kinds of solid-water two-phase flows for various flow rates and particle concentrations. We found an accurate measuring method for spherically shaped particles. The results are also shown in a simple experimental formula for practical use.

Key Words: Multi-phase Flow, Flow Measurements, Flowmeter, Venturitube, Heterogeneous Solid-Liquid Two-Phase Flow.

1. 緒 言

中粒子固液二相流⁽¹⁾は、固体の水力輸送、港湾のしゅんせつなどの広い応用との関連において、その詳細な挙動の解明がまたれている。言うまでもなく、流量・濃度の精密計測はこのような応用にはもちろん研究にも不可欠であるが、既存の計測法⁽²⁾のいずれもがあまりにも低精度であるか、または、手順が非常に煩雑であるなどの実用上多大の不便が生じている。

のど部前後の増減速流において、粒子のすべりが濃度および流量により著しく変化するベンチュリ管は、このような二相流の有力な計測器になると十分考えられる。たしかに、ベンチュリ管に関する文献によれば、ベークライトおよび岩石粒子と水の二相流における流量係数のレイノルズ数依性⁽³⁾、流量・濃度の同時計測の可能性⁽⁴⁾、鉛・砂などの重粒子の二相流の流量係数⁽⁵⁾、細小粒子と水の二相流における流量係数の特異な挙動⁽⁶⁾、および、既存モデル⁽⁵⁾⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾による計算と既実験⁽⁴⁾との対比⁽⁷⁾、などの報告があるが、残念ながら、

これらのいずれの測定精度も不十分で、得られた結果は単に定性的知見にとどまっている。したがって、ベンチュリ管が中粒子固液二相流の実用的に十分な精度の計測器となるためには、流量係数に対する支配因子をより詳細に明確化するとともに、より多くの広範囲の濃度・粒子の種類に対する高精度の資料の著積が不可欠と言えよう。

よって本報では、この種の研究の第1歩として、円すい形ベンチュリ管を通る各種の固体中粒子の二相流を組織的に精密実験し、粒子の種類、流速、濃度などによる流量係数などの詳細な挙動の解明を試みた。

2. 実験装置と方法

2・1 装置 図1に使用した装置の概略を示す。地下水槽よりくみ上げられ、ヘッドタンクで一定水位に保たれた清水は、52 mm 径の高精度ノズル流量計および流速監視用電磁流量計①を経て、密閉フィーダより所要量の固体粒子が供給され、所定濃度の中粒子固液二相流となって27.6 mm 径管、縮小管を経て、水平流または垂直流下し、供試ベンチュリ管②に入る。次いで、粒子分離タンク③を経て、清水のみが地下水槽に還流する。

なお、流量係数に対する曲がり管などの影響を十分

* 平成2年3月10日 東北支部第25期総会講演会において講演、原稿受付 平成元年9月25日。

^{*1} 正員、秋田大学鉱山学部 (〒010 秋田市手形学園町1-1)。

^{*2} 正員、東北大学流体科学研究所 (〒980 仙台市青葉区片平2-1-1)。

きん小とするために、ノズル流量計および供試ベンチュリ管の上流直管路長さを十分長い3m（それぞれ管径の約60倍および約100倍）としている。

2.2 供試ベンチュリ管 図2に真ちゅう製の供試円すい形ベンチュリ管を示す。入口および出口の直径 D はともに27.6mm、のど部径は17.0mm、絞り面積比 m は0.379で、入口および出口の円すい角は約 21° および約 7° である。複雑な粗さの影響を除去するために、内面は十分滑らかに仕上げてある。図2に示すように流れ方向の3箇所に、3mm径圧力測定孔（周方向に各4個）タップI～IIIを設け、これらを砂だまりを介して圧力変換器につないでいる。

2.3 供試固体粒子 粒子には、種々の性質のもの、すなわち、大小2種の砂粒子、密度が水に十分近い大・中・小のスチロール球状粒子、および、粒子形状の影響をみるためにビニール円柱粒子（直径4.0mm、平均縦横比1.25）を選んでいる。表1および図3に、これらの供試固体粒子の寸法と粒度分布を示す。ここで、代表粒径 d_s [mm]は、累積重量分布50%における粒子の球相当直径である。

2.4 実験方法 それぞれの粒子について、吐出し平均流速 V_m および、吐出し体積濃度 C_v を系統的に変えて実験した。また、入口（絞り前）とどの部の差圧 P を用いて、見掛けの流量係数 C 、見掛けの流量係数比 $\bar{C}$ 、二相流での流量係数 C_m 、二相流での流量係数比 $\bar{C}_m$ 、のど部の圧力降下比 K を次のように定義した。

$$C = \frac{Q\sqrt{1-m^2}}{A\sqrt{2P/\rho_0}}, \quad \bar{C} = \frac{C}{C_0}$$

$$C_m = \frac{Q\sqrt{1-m^2}}{A\sqrt{2P/\rho_m}}, \quad \bar{C}_m = \frac{C_m}{C_0}$$

$$K = (P - P_0)/P_0$$

ここに、 Q は吐出し体積流量、 A はのど部断面積、 m は絞り面積比 A/A_0 、 A_0 は入口断面積、 ρ は密度を示す。また、添字0は清水の場合、 m は固水二相流の場合を示す。

次いで、それぞれの粒子について、流速 V_m をほぼ一定に保ちながら、バルブを調節して適宜の濃度の固水二相流を形成させ、流れが十分安定してから測定を開始した。水平および垂直下向き流れの実験は同じベンチュリ管を付け替えて行った。また、管内の粒子流れ状態の観察のために、透明アクリル樹脂ベンチュリ管を別に用意し、露出時間が $1\mu s$ のストロボによる瞬間写真観察を行った。

2.5 測定誤差 既存のデータが大きくばらつき、精度の悪いのは、主として流速 V_m の測定精度にある

とみられたので、 V_m の決定には特に留意し、高精度ノズル流量計による平均水流速と、重量法による粒子流量とから算定することにした。また、有害なキャビテーション発生を考慮して、絞り面積比 m の異なる二つのノズル流量計（流量係数はそれぞれ0.950および0.943）を適宜使用した。セパレータ出口で約20秒に採取される固体粒子の量と V_m より吐出し体積濃度 C_v を算出したので、 C_v の誤差は0.5%以内と見積も

表1 供試粒子

Particle	Density $\times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$	Shape	Median diam. d_s mm
Sand (L)	2.63	—	1.78
Sand (S)	2.63	—	0.30
Vinyl Pellet	1.38	cylinder	4.93
Styrol Ball (L)	1.03	sphere	2.66
Styrol Ball (M)	1.03	sphere	1.45
Styrol Ball (S)	1.03	sphere	0.60

図1 実験装置の概要

図2 供試ベンチュリ管

られる。また、使用したビジグラフの記録紙の幅 120 mm から圧力 P の誤差は 0.5 % 以内と見積られる。

3. 実験結果

まず、清水実験について、差圧 P と V_m との関係曲線を求め、供試管の摩耗度を判定し、わずかも曲線に変化が現れれば直ちに新しいベンチュリ管と交換した。

3.1 測定精度 まず、ばらつきの少ない高精度の中粒子二相流計測の可能性を追求してみよう。図 4 (a), (b) には、種々の粒子に対して、水平ベンチュリ管と垂直下向きベンチュリ管について求めた圧力降下比 K と、 C_v および V_m の関係を示す。ここに、図 4 中の実線は後述の実験式による結果を示す。明らかに、ばらつきは、水平、垂直管のいずれの場合にも十分に小さいので、関与因子の効果が明確になれば、逆にこのようなベンチュリ管により中粒子固水二相流の高精度測定が可能になったと言える。

さて、粒子の種類により K - C_v 曲線が大幅に変化する事実は注目に値する。すなわち、密度が水にほぼ等しいスチロール球状粒子の場合には、 K は C_v , V_m のいかんにかかわらずほぼ零で一定であり、 $C_v=30\%$ のように粒子がかなり多量に含まれていても、流れの様相が単相水流のそれとかなり近いことを示している〔図 5 (a), (b)〕。しかし、砂、ビニール粒子の場合には、これとは大いに異なり、 K - C_v 曲線は、上向きに凹状の曲線で表され、 C_v が大きくなるほど K は大となり、流れが不均一流れとなっていることを示している。特に、水の密度に近いビニール円柱粒子(図 4 中の 3) の場合の曲線がスチロール粒子または水の $K=0$ から著しく離れており、顕著な粒子形状効果を明示している。また、水平管の曲線は V_m により大きく異なるが、垂直管では V_m によりほとんど変わらず、 K - C_v 性能に対する V_m の効果は水平管に主として現れることを示している。

一方、やや高い密度の砂粒子の場合には、粒径差、粒度分布などの影響は、水平、垂直ベンチュリ管のいずれの場合のかなり高濃度 C_v の場合においてもたかだか数%にとどまっており、粒径または粒度分布に若干考慮を払いさえすれば、十分な精度で K を予知できることを示している。この点は実用的見地から注目に値しよう。

3.2 流量係数 図 6 (a), (b) には、ベンチュリ管を通る中粒子固水二相流の流量特性を知るために、見掛けの流量係数の比 $\bar{C}$ と C_v および V_m との関係を種々の粒子について示してみた。

スチロール粒子の場合の $d_p < 1.45$ mm においては、流量係数 C は実験の範囲内で清水のそれに等しく、流れパターンが単相水流に酷似していることを示している。しかし、やや大粒径 $d_p > 2.66$ mm, $C_v > 20\%$ の高濃度領域でわずかに $\bar{C}$ が低下し、当然のことながら中粒子の影響は大径粒子ほど大きいことを明示している。

C と C_v の差を基に濃度を算出する本計測法では、この差が大きいほど高精度濃度測定が可能となる。予想されたように、重い砂粒子の $\bar{C}$ は、 C_v の増加とと

図 3 供試粒子の粒度分布

図 4 圧力降下比 K と濃度 C_v との関係

図5 ベンチュリ管内の瞬間写真

もに1.0より大幅に小となる。特に、やや大径の砂粒子(L)では、 $C_v=30\%$ で15%も小となり、十分な高精度での流量、濃度の計測の可能性を示している。さらに、砂粒子(L)と砂粒子(S)の場合の $\bar{C}$ の差はたかだか数%である。したがって、大まかに粒径差の影響を考慮すれば十分な精度で流量・濃度の測定が可能であるとも言える。また、流速 V_m の効果は、球対称性が著しく低い大径ビニール円柱粒子の場合にのみ現れ、著しい粒子形状の効果を示している。さらに、このビニール円柱粒子の場合においても、垂直管の $\bar{C}-C_v$ 曲線は流速 V_m にほとんど依存しないから、流量、濃度の計測の見地からは水平ベンチュリ管より垂直ベンチュリ管が有利であると言えよう。

3.3 二相流の流量係数 C_m 最後に、「重粒子の場合に、のど部での不十分な粒子加速により $\bar{C}_m$ が1より大きくなる」という興味ある現象⁽⁵⁾⁽⁷⁾に注目しよう。図7(a), (b)に、二相流で一般に用いられている流量係数の比 $\bar{C}_m$ と C_v の関係を種々の粒子について示す。予想されたように、重い砂粒子の場合には、今回の全測定領域でこの現象が認められた。それに対し、軽い粒子であるビニール、大径のスチロール粒子(L)の場合には全く認められないが、微小スチロール粒子(S)の場合の $C_v>22\%$ の高濃度領域で、わずかながらこの現象が認められた。よって、粒子の密度のみならず粒子径もまたこの現象の有力な要因であることがわかる。この辺の詳細については今後の解明を期待する。

3.4 実験式 K , $\bar{C}$ などが正確に求められたので、流量・濃度の高精度計測が可能となったと言える

図6 流量係数比 $\bar{C}$ と濃度 C_v との関係

が、グラフの読取り誤差も無視できないし、実用上も不便なので実験式を求めておこう。本実験の結果がすべて二相流の平均密度 ρ_m の関数となることを考慮して、圧力降下比 K , 流量係数の比 $\bar{C}$ を次式のようにまとめた。

表 2 K, n 係数

Particle	V_m m/s	Vertical		Horizontal	
		k	n	k	n
Sand (L)	1.0~4.7	0.88	1.28	0.94	1.25
Sand (S)	1.0~4.7	0.84	1.30	0.86	1.23
Vinyl Pellet	2.5~4.7	2.95	1.41	3.15	1.42
Vinyl Pellet	2.0	2.95	1.41	3.49	1.41
Vinyl Pellet	1.5	2.95	1.41	3.90	1.39
Vinyl Pellet	1.0	2.95	1.41	2.89	1.15
* Styrol Ball (L)	1.0~4.7	4.08	1.39	4.08	1.39

*** スチロール球 (L) の場合

 $C_v \leq 15\% \rightarrow K=0$ $C_v > 15\% \rightarrow K = k\{(\rho_s/\rho_0 - 1)(C_v - 0.15)\}^n$ 図 7 流量係数比 $\bar{C}_m$ と濃度 C_v との関係

$$K = k(\rho_m/\rho_0 - 1)^n \quad (1)$$

$$\bar{C} = 1/\sqrt{1+K} \quad (2)$$

ここに、 $\rho_m = (1 - C_v)\rho_0 + C_v\rho_s$, ρ_s, ρ_0 は二相流、固体粒子および清水の密度である。また、係数 K, n は表 2 に示す。2・5 節の測定誤差を考慮すれば、 K の誤差は大きく見積もっても 0.7% 以内と推定される。これらの式による計算結果を図 5~7 の実線で示している。簡易な表示の実験式ではあるが実験との一致は十分良好と言えよう。

さて、ベンチュリ管の差圧 P および二相のうちいずれかの計測流量（たとえば固体粒子量） F は、式 (3), (4) に示すように、いずれも V_m と C_v の関数であるから、逐次近似法を適用すれば、測定した P および F から V_m と C_v の 2 量は容易に精度良く求まる。

$$P = f_1(V_m, C_v) \quad (3)$$

$$F = f_2(V_m, C_v) \quad (4)$$

4. 結 言

ベンチュリ管の流量係数ならびに流れパターンと、固体粒子の種類、流速、濃度などとの関係を十分な精度のもとに実験的に解明した。結果を要約すると以下のようなになる。

(1) 水平、垂直ベンチュリ管のいずれにも適用できる球対称性がある中粒子固水二相流の簡便かつ精密な流量・濃度の計測法を確立した。また、球対称性が少ない中粒子固水二相流においても、垂直ベンチュリ管において精密な計測が可能であることも示した。

(2) 水平、垂直ベンチュリ管のいずれの場合にも、ベンチュリ管の特性曲線、すなわち、 $K-C_v, \bar{C}-C_v$ 曲線は、粒子の種類によって大幅に変わるが、球対称がそれほど悪くない重粒子（砂粒のようなもの）の場合には、粒径がかなり変わっても特性曲線はあまり変わらないという実用的見地からみて興味ある結果を見いだした。また、「重く、大きな粒子ほど特性に与える影響が大きい」という既研究結果の妥当性を確認し、さらに、粒子の形状の影響も大きい（特に水平ベンチュリ管でしかり）ことを示した。

(3) 重い粒子の加速がどの部で不十分になることにより流量係数が増大するという興味ある現象は、砂粒子の場合の今回の全実験範囲 ($C_v < 30\%$) で認められた。また、粒子径もこの現象の要因になることが判明した。

(4) 圧力降下比 K および流量係数の比 $\bar{C}$ に対する高精度の実験式を示した。

(5) 密度が水のそれに近い粒子の場合には、かなりの高濃度の中粒子二相流においても、単相水流の特性に非常に近いベンチュリ管特性を示す。

終わりにのぞみ、本研究に対しご指導をいただいた東北大学 大場利三郎教授に、また有益な助言をいただいた井小萩利明助教授に感謝の意を表す。また、実験に助力した学生諸君に感謝する。

文 献

- (1) 池森, 機誌, 66-537 (1963), 112.

- (2) 佐野, 第4回混相流シンポジウム講演論文集, 東京, (1985-12), 137.
 - (3) Brook, N., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, **176** (1962), 127.
 - (4) Graf, W. A., *IAHR, J. Hydraul. Res.*, **5** (1967), 161.
 - (5) Shook, C. A. and Masliyah, J. H., *Can. J. Chem. Eng.*, **52** (1974), 228.
 - (6) Herringe, R. A., *Int. J. Multiphase Flow*, **3** (1977), 285.
 - (7) Arastoopour, H. and Gidaspow, H., *Two-Phase Flow Heat Transf. Simp. Workshop*, (1978), 133.
 - (8) Soo, S. L., *Fluid Dynamics of Multiphase Systems*, (1967), 279, Blaisdell Pub. Co.
 - (9) Gidaspow, D., *Proc. NATO Adv. Study Inst. Two-Phase Flows and Heat Transf.*, Istanbul, (1976-8), 16.
 - (10) Deich, M. E., *High Temperature*, **12** (1974), 299.
-