

混相流に関する研究 (第3報)¹⁾

固-液相系混相流の分岐管における
特性についての基礎的研究

山下貞二*・吉福功美**

THE STUDY ON THE FLOW OF SOLID-LIQUID PHASES (REPORT 3) THE FUNDAMENTAL STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF THE FLOW OF SOLID-LIQUID PHASES IN THE BRANCHED PIPE

Sadaji YAMASHITA and Isami YOSHIFUKU

As the characteristics of the flow of solid-liquid phases in the branched pipe, the branch ratio is correlated with the dimensionless groups Fr , $1-\alpha_1$ and $\theta/180$ in case of mixed phases flow containing the same kind of particles.

On the experimental operation, it is noticed that we have to take into consideration the effects of the inclination in the manufacture of branched pipe and the curvature of vinyl connecting pipe on the experimental data.

Received May 31, 1961.

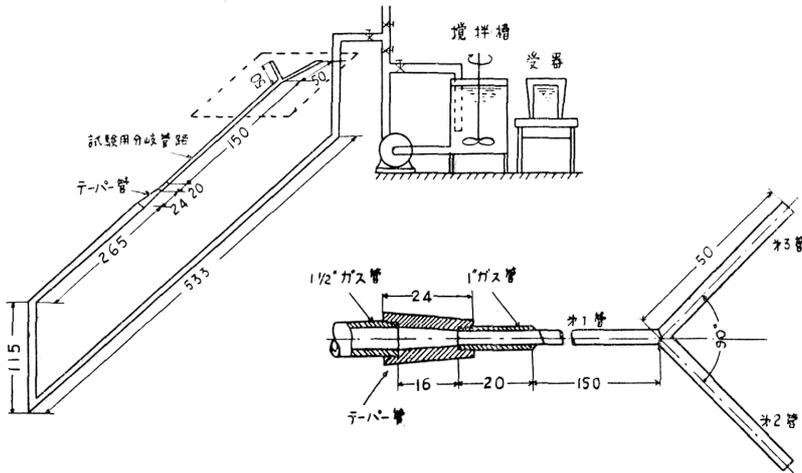
1. 緒 言

本報告は砂粒混在の流水中の砂粒の挙動についての一連の研究²⁾において特に分岐管における混相流の特性について基礎的考察を行い、更に実験装置の製作、

取付け及び実験操作等の分岐管の特性に及ぼす影響について推計学的に論究したものである。

2. 実験装置および方法

(a) 実験装置 第1図に示す如く攪拌槽で任意の濃



第1図 実験装置 (単位 cm)

第2図 試験用分岐管路 (単位 cm)
内径 2.44cm

度に混合した混相流を 3 HP サンドポンプを通して 1 1/2"

ガス管の管路内 (水平流水平面, 水平流垂直上昇面, 水平流垂直降下面, 上昇流, および降下流の 5 種類)

* , ** 応用化学教室

を流動させ管路末端にテーパ管にて内径 2.44cm の各種分岐管路 (分岐角 $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$) を附して実験を行い各管の濃度, 流速を計測し分岐比を検討したものである。なお流水中には土岐津けい砂 4号³⁾ (平均粒径 0.66mm, 真比重 2.61, 見掛け比重 1.60) を混在させた。

(b) 実験方法

流水中の重量濃度百分率は本管 (第1管) 中で 0, 5, 10, 20, 30% の5種とし試験用分岐管路 (第2図) の主管 (第2管), 枝管 (第3管) の各流出口より流出させビニールパイプで受器に導き3乃至4種類の流速変化の下で実験時間 t [sec], 砂と水の全重量 w [kg], 砂の重量 w_s [kg] を計測し, 第1, 2, 3管における重量濃度百分率 α [%], 平均流速 u [m/sec] 等を求め主管の本管に対する流速, 全重量および砂の重量比 (一般的に分岐比と称する) β, τ, δ を計算した。

3. 基礎的考察

(a) 分岐比について

試験用分岐管路の中で本管 (第1管) と主管 (第2管) が同一直線上にあり枝管 (第3管) がそれより分岐角 θ をなしているのを非対称分岐管路と名付け主管と枝管が本管に対して対称をなしているのを対称分岐管路と名付ける (この場合は主管と枝管は同等であり第2図に示してあるのは $\theta=90^\circ$ の対称分岐管路である)。

いま本管, 主管および枝管をサフィックス 1, 2, 3 で示し流速, 砂と水の全重量, 砂の重量を前述の如く u, w, w_s で表わすと分岐点の定義より

$$\beta = u_2/u_1 \quad (1)$$

$$\tau = w_2/w_1 \quad (2)$$

$$\delta = w_{s2}/w_{s1} \quad (3)$$

砂の重量濃度百分率を α で表わすと

$$\alpha_2/\alpha_1 = (w_{s2}/w_2)/(w_{s1}/w_1) = \delta/\tau \quad (4)$$

$$\alpha_3/\alpha_1 = (1-\delta)/(1-\tau) \quad (5)$$

又流速については次の関係がある (各管は同一内径)。

$$u_1 = u_2 + u_3 \quad (6)$$

以上の諸式より本管における濃度 α_1 , 流速 u_1 が与えられた場合, 主管および枝管における濃度 α_2, α_3 , 流速 u_2, u_3 を推定するには分岐角度 θ における分岐比 β, τ, δ が理論的あるいは実験的に流動条件その他の関数として求められればよい事になる。

(b) 次元解析について

対称分岐管路においては分岐比は 0.5 附近を取る事が分るが非対称分岐管路の場合は各管路の種類 (水平, 上昇, 降下等) により異なり, 同じ管路でも分岐角 θ によつて大きく影響され更に本管の濃度, 流速によつても影響される事が予想される。

分岐比を理論的に解析する事は流動状態を規定する物理変数の多様性のため甚だ困難であるので, 次元解析を行う事とする⁴⁾。

分岐比に影響を及ぼす因子としては粒子の径 d_p , 密度 ρ_p , 重力の加速度 g , 本管における混相流の濃度 α_1 , 流速 u_1 , 密度 ρ , 粘度 μ , 管路の内径 D , および分岐管角度 θ などの流動条件の因子が考えられる。

従つて分岐比に及ぼす流動条件以外の因子 (例えば分岐管の製作, 取付け, 実験操作, 実験者などで外部の実験要因と名付け次章に説明する) の影響を無視すれば分岐比 ($B.R$ で示す) は次の関数として表わされる。

$$B.R = \phi(d_p, \rho_p, g, \alpha_1, u_1, \rho, \mu, D, \theta) \quad (7)$$

(7) 式に次元解析を行うと

$$B.R = \phi(d_p/D, u_1^2/gD, Du_1\rho/\mu, \rho/\rho_p, 1-\alpha_1, \theta/180) \quad (8)$$

ここで本実験では同一種の粒子を用いたので, この場合は $d_p/D, \rho/\rho_p$ は一定であり又混相流の粘度の測定は困難を極めるので Re 数を除外して考えると結局

$$B.R = \phi(F_r, \alpha_1, x) \quad (9)$$

ただし

$$F_r = u_1^2/gD \quad (10)$$

$$x = \theta/180 \quad (11)$$

となる。即ち分岐比は同一種の粒子の場合, 管路のフルード数 F_r , 混相法の濃度 $1-\alpha_1$, および分岐角度 $x = \theta/180$ にて表わされる事が分る。

各種管路における (9) 式の実験的研究は後に報告する予定であり, 具体的な実験式などについてはここでは触れない事にする。

4. 分岐比に及ぼす外部の実験要因について

前述の如く (9) 式の実験的究明を行うに先立つて, 我々は我々が得た実験データ, 即ち製作所において製作され, 装置された分岐管路によつて実験者が実験して得たデータは如何なる程度に信頼できるか, 又如何なる外部の実験要因によつて影響を受けるかを究明する必要がある。

我々の目的とする所は非対称分岐管路の特性である

が、その場合得られるデータの信頼度についてこれを推定する一つの方法として、又予備実験として分岐比の期待値が 0.5 である所の対称分岐管路について、水平流水平面の場合、実験する事にした。実験装置および方法は前述の通りである。

(a) 実験装置全体が正しく作られており、実験者は正しく実験したといえるか否かについて

これは換言すれば我々が得たデータは正しくないといえるか否かを検定するものである。

もし製作所が分岐管路を正しく製作し、我々が正しく装置し、正しく実験したとすれば分岐比は 0.5（期待値）を取る筈である。しかるに実に実験すれば製作、装置、実験操作その他測定、計算などによる誤差によって正確に 0.5 を示さず大体において 0.5 を中心としたばらつきを示す。即ち実験誤差を考慮すれば当然 0.5 でない値を取る事になる。従つて実験データが正しく 0.5 を取らなかつたからといって、この分岐管路の製作、装置、実験操作などが正しくなかつたという事は出きない。しからば分岐比の値が如何なる範囲外の値を取つたらこの実験データは正しくない、即

ち製作装置、実験操作が正しくないという事が出きるかを χ^2 -検定で求めてみる。

今、実験装置の本管に実験時間 t [sec] について w_1 [kg] の混相流を流すものとし、第 2 管、第 3 管に夫々 $w_2=rw_1$, $w_3=(1-r)w_1$ [kg] が流れたとする。この場合の w_2 , w_3 の期待値は $(1/2)w_1$ なる故、次式で表わされる χ^2

$$\chi^2 = \frac{(w_2 - (1/2)w_1)^2}{(1/2)w_1} + \frac{(w_3 - (1/2)w_1)^2}{(1/2)w_1} = 4w_1(r-0.5)^2 \quad (12)$$

が χ^2 -分布表の自由度 $d.f=1$ に相当する $\chi^2_{0.05}(d.f=1)$ より大なる時は 5% の有意水準で有意であると判定する、即ち実験データは正しくないといえることになる。

従つて有意となる境界の r の値を r_m (危険重量比) と置くと

$$4w_1(r_m - 0.5)^2 = \chi^2_{0.05}(d.f=1) = 3.841465 \\ \therefore r_m = 0.5 \pm 0.980/\sqrt{w_1} \quad (13)$$

(13) 式より種々の w_1 に対し r_m の上限および下限を計算すると第 1 表となる。

第 1 表 危険重量比 (r_m)

W_1 [kg]	4	5	6	40	50	400	500	5000
r_m (上限)	0.99	0.939	0.900	0.655	0.639	0.549	0.544	0.514
r_m (下限)	0.01	0.061	0.100	0.345	0.361	0.451	0.456	0.486

我々の家験においては $w_1 < 40$ [kg] である、即ち我々の得たデータが $r=0.655 \sim 0.345$ 以外の範囲にある時は実験は正しくないといえる。実際に得られたデータは大きく見て 0.45~0.55、普通は 0.48~0.52 にあるのが殆どであつた。従つて我々の実験データは正しくないとはいえないという結論になる⁶⁾。

実験誤差を含む工学的実験においては我々の得たデータは正確に正しいという事は出来ないが、大体において正しいといつてもよいと考える事ができる。

即ち製作所は正しく製作し、装置し、我々は正しく実験しているという事が大体において言えるのである。

以上の事は r についてであつたが β , δ についても同様な事がいえる。 δ については $w_{s1} < 5$ [kg] で r_m 上限が非常に大きくなつている。第 1 表よりも w_1 を 500 [kg] で実験したとすれば 0.45~0.55 の時は実験データが正しくないと判定される場合が起りうるであ

らうという事が分る。

(b) 分岐管の製作上の偏り

(a) において大体において実験データは正しいといえる事が分つた。従つて本実験を進行させるに十分な根拠を得たのであるが、次に製作、装置、実験操作など外部の実験要因の個々について分岐比に及ぼす影響を調べてみる。

まず製作上の偏りであるが、これは分岐部に偏りがあるか否かを検定するもので、もし分岐部に偏りがなければ分岐比は期待値 0.5 のまわりにばらついている筈である。従つて分岐管の配置を逆にしても同じである。しかるに、もし分岐部に偏りがあるとすれば、例えば初め右方に置いた第 2 管が出やすい様な ($r_{2-右} > 0.5$) 偏りがあるとすれば逆の配置にしても第 2 管が出やすい (即ち $r_{2-左} > 0.5$ 従つて $r_{3-右} < 0.5$) 筈である。

(ここで $r_{2-右}$ は第 2 管を右方に $r_{2-左}$ は第 2 管を左方に置いた場合で $r_{3-右} = 1 - r_{2-左}$ の関係があり、計

算上 r としては右方管を基準にして求めている。清水によつて（ビニールパイプを取除き分岐管の配置以外の影響がないようにして）得られたデータで大体において上述の偏りの傾向を示しているのがあつた（我々の用いた中で $\theta=90^\circ$ の対称分岐管路ではそうであつた）。即ちこの場合、分岐部に偏りがあるのではないかと推定される。

これを t -分布表によつて検定してみる。

次のような3個の母集団を考える。

母集団 1：分岐部が正しく作られていて（偏りがなくて） $\mu_1=0.5$ を中心にしてばらついている母集団。

母集団 2：分岐部に偏りがあつて $\mu_2=0.5+\epsilon$ を中心にしてばらついている母集団。

母集団 3：問題にしている分岐部を使つて無限個の試験をして得られる r からなる母集団。大きさ n （平均値を \bar{r} 、標準偏差を S_r とする）のサンプルを我々はこの母集団から抽出したと考える。

母集団 3 は母集団 1, 2 の何れかに属するわけであるが、ここで我々は母集団 3 は母集団 1 に属すると仮定する、即ち $\mu_3=\mu_1$ なる仮説を立てる（ μ_3 は母集団 3 の平均値）。

次式

$$t = (\bar{r} - \mu_1) / (S_r / \sqrt{n}) \tag{14}$$

で与えられる t が t -分布表より得られる有意水準 5%、自由度 $d.f=n-1$ に対応する値 $t_{0.05}(d.f=n-1)$ より大きければ、即ち有意であれば 5% の有意水準で仮説 $\mu_3=\mu_1$ を棄却する。即ち母集団 3 は母集団 1 に属するとは言えない、即ち分岐部に偏りがあると言える事になる。第 2 表に 1 例として分岐角 $\theta=90^\circ$ の場

第 2 表 分岐部の偏り (r)

r_2 -右	0.507	0.517	0.509	0.508
r_2 -左	0.507	0.508	0.507	

合のデータを示す。(14) 式に $n=7$, $S_r=3.606 \times 10^{-3}$, $\bar{r}=0.509$, $\mu_1=0.500$ を代入すると

$$t=6.604 > t_{0.05}(d.f=6)=2.447$$

$$t=6.604 > t_{0.01}(d.f=6)=3.707$$

この場合は高度に有意であるといえる。他の分岐管についての試験で有意でない判定されたのもあつた。

従つて全ての分岐管に偏りがあるとは断言できないが、少くとも偏りのある分岐管もあるという事は言える。

次にこの場合の偏りの大きさを求めてみると偏り ϵ の平均値の 95% の信頼区間は

$$0.00567 < \epsilon < 0.0123$$

となる。即ち大きくみて実験データ分岐化の値に小数第 2 位に 1 だけの誤差を与える事が分る。相対誤差は 1.1~2.5% である。

即ち分岐部の偏りは製作上どうしてもさける事は出来ないと考え事が出き、実験データの小数第 2 位に 1 だけの誤差を覚悟しなければならない。

有意と判定できなかつた分岐部については偏りによる誤差は実験誤差範囲内であつたと考える事ができる。

(c) 実験装置による影響

実際の実験においては装置の取付けの関係上分岐管路を水平下管路と平行にできなかつた。この取付けによる影響があるか否かを検定するために水平下管路に対する分岐管路のなす角度 φ を $10^\circ 20'$ から（この角度で本実験を行つた） $21^\circ 54'$ に変化して分岐管の取付けによる影響、即ち遠心力によつて外側の方の分岐管に混相流は流される傾向があるか否かを検定した。

第 3 表に A ($\varphi=10^\circ 20'$)、B ($\varphi=21^\circ 54'$) の場合につ

第 3 表 装置の影響 (r)

A	0.511	0.510	0.507	0.510
B	0.507	0.509	0.508	

いてデータを一元配置法により並べたものを示す。分散分析表を第 4 表に示す。

第 4 表 装置の影響 (分散分析表)

要因	S.S	d.f	M.S	F	F (0.05)	F (0.01)	判定
A B 間	4	1	4	1.36	6.61	16.26	
残査	11	5	2				
計	15	6					

上表より有意でないとは判定できる。即ち装置による影響はあるとはいえない。この場合A, Bの平均値の差は0.002で相対誤差0.4%である。装置による影響は実験誤差範囲内でしかないという事ができる。

(d) ビニールパイプの影響

次に実験操作上受器への連絡管として用いられたビニールパイプの影響であるが、その曲りの程度を次の2つの水準に分けた。

①：ごく自然にたわむ程度。

②：①より少し大きく曲げる。

原則として我々はビニールパイプの曲りを①の状態で行ったのであるが、或る分岐角の分岐管では

どうしても②の状態で行った。その影響が有意と判定されるであろう事は予想されるのであるが、予備実験として対称分岐管路で行った実験結果を第5表に示す。ここで

第5表 ビニールパイプの影響 (r)

A	0.501	0.498	0.496	0.502	
B	0.501	0.500	0.505	0.507	0.507

A：第2管……①, 第3管……①

B：第2管……①, 第3管……②

である、即ち第3管を故意に少し大きく曲げてその影響を調べてみた。分散分析表を第6表に示す。

第6表 ビニールパイプの影響 (分散分析表)

要因	S.S	d.f	M.S	F	F (0.05)	F (0.01)	判定
A B 間	75	1	75	12.21	5.59	12.25	*
残 査	43	7	6.14				
計	118	8					

上表より高度近くに有意である事が分る。ビニールパイプの曲りによつて分岐比は影響を受けるといえる、この事はビニールパイプを用いて分岐比を測定する方法の欠点であり、我々は本実験を行うに際し細心の注意を払つて出きるだけビニールパイプの曲りを一様にして実験を行わねばならなかつた。

上の場合、ビニールパイプの曲りからくる誤差は0.005で相対誤差1.0%である。即ちビニールパイプの曲りを一様にしないことによりデータの小数第3位に大きく影響する事が分つた。

(e) 実験者の影響

次に実験操作上の問題として実験者による影響が考えられる。勿論、実験当初は不慣れのためにデータが大きくなばらつきを見せたが、一定期間後は大体において実験者は十分熟練した状態で実験を行うことが出来るようになった。しかしそれでも個人差による誤差は

あると考えられるので実験者以外の条件は一定にしてその影響を調べてみた。第7表に二元配置法によるデータを示す、列のデータは流速の変化を示し、行はA

第7表 実験者の影響 (r)

	u ₁	u ₂	u ₃	u ₄
A	0.509	0.506	0.504	0.508
	0.506	0.503	0.511	0.506
B	0.507	0.510	0.513	0.511
	0.507	0.508	0.511	0.512

は例えばS君を第2管、Y君を第3管においたものBはY君を第3管、S君を第2管においた場合である、かくすれば個人差が2倍になつてデータに影響する誤である。

分散分析表を第8表に示す、即ち有意とは判定され

第8表 実験者の影響 (分散分析表)

要因	S.S	d.f	M.S	F	F (0.05)	F (0.01)	判定
A B 間	21.3	1	21.3	4.26	5.32	11.26	
u 間	26	3	8.7	1.74	4.07	7.59	
交互作用	39.7	3	13.2	2.64	4.07	7.59	
残 査	40	8	5				
計	127	15					

ない。この実験結果からは個人差があるとはいえない事が分つた。絶対に個人差がないという訳ではなく、あつても実験誤差範囲内にしかすぎないという訳である。なおA、B間の平均値差は0.003、相対誤差0.6%である。以上の事は r についてであるが β 、 δ についても同様であつた。

以上外部的実験要因の個々について対称分岐管路についての実験結果からその分岐比に及ぼす影響を調べて来た。偏りのある分岐管による誤差が非常に大きく、次いでビニールパイプによる誤差が大きい事が分つた。その他の要因による影響は実験誤差範囲内にしかすぎない事も分つた。

次に分岐比を測定して得た実験データの全体的な実験誤差はどれ位であるかを考えると我々が偶然に偏りのある分岐管を悪く装置し、ビニールパイプの影響を大きく受け、個人差が大きく表われるように実験するという事はめつたにないと思える事ができる。即ち個々の誤差の計0.02を超える事はめつたにないと考えてよいけれども、大きく見て0.02即ち小数第2位に2の誤差は覚悟しなければならぬと思えられる。即ち約4%内外の相対誤差はあると考えて本実験のデータの解析は行わねばならぬと思えられる。

5. 結 語

以上を要約すると固-液相系の混相流(同一種の粒子を含む場合)が分岐管路を流動する場合、その特性としての分岐比は次元解析により流動条件の要因、管路のフルード数 F_r 、混相流の濃度 $1-\alpha_1$ および分岐角 $\theta/180$ によつて表わされる事が分つた。

又実験操作上大験において分岐管路は正しく製作され、正しく装置され、正しく実験が行われたと考えてよい事、外部的実験要因のうちで製作上の偏り、ビニールパイプの曲りが実験データに大きい影響を及ぼすが、その他の要因は実験誤差(相対誤差で約4%は覚悟せねばならない)範囲内にある事が明らかにされた。

6. 後 記

本実験は筆者の一人が多年に渉つて研究して来た一連の研究の延長であり、液体輸送、空気輸送等の研究における幾多の先人の文献に示唆を受けた点が多い。此処に謝意を表す。また実験に協力した鹿大工学部応用化学科化学工学専攻学生浜田忠嗣、川崎皆夫、松田祥一、山城弘士、秋山竜三、荒牧実男および四蔵和夫の7君の労を謝すものである。

文 献

- 1) 山下貞二、吉福功美：日本機械学会第38期通常総会講演前刷集，No. 43，p. 175~178 ('61-4)。
- 2) 同上：同上第36期通常総会講演前刷集(流体工学) No. 4，p. 183~188(昭34.4)。
- 3) 山下貞二：機械学会論文集，第23巻第134号，p. 734~742(昭34.10)。
- 4) 「かような場合、結果を表現するに当つて、各変数を無次元の数にまとめ、かかる無次元群を変数とする式にて表わすのが最も便利であるので、次元解析が採用される。」
- 5) 例えば、東工大統計工学研究会編：統計工学ハンドブック(技報堂、昭和29年)数値表。
- 6) 「しからば正しいといえるか」と推計学ではいえないのである。」