

# 混相流に関する研究(第4報)

固-液相系混相流の水平流分岐管路における特性について

山下 貞二\*・吉福 功美\*

## THE STUDY ON THE FLOW OF SOLID-LIQUID PHASES (REPORT 4)

### ON THE CHARACTERISTICS OF THE FLOW OF SOLID-LIQUID PHASES IN THE BRANCHED PIPE INSTALLED IN HORIZONTAL LINE

Sadaji YAMASHITA and Isami YOSHIFUKU

In experimental investigation, it is found that the branch ratios, as the characteristics of the flow of solid-liquid phases containing the same kind of particles in the branched pipe installed in horizontal line, increase with the branch angle  $\theta$ , but does not varies with  $F_r$  and  $\alpha_1$  and the branch ratio is correlated with  $x$  in the following equation.

$$BR=0.5+x/(a+bx)$$

where

$$x=\theta/180$$

and constant  $a, b$  were determined.

Received May 31, 1962

## 1. 緒 言

前報<sup>1)</sup>において固-液混相流が各種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要因  $F_r$ ,  $1-\alpha_1$ ,  $\theta/180$  により表わされる事が分つた。

本報告では前報で明らかにされた実験的外部要因の影響を考慮し、試料取出管として大きい誤差をもたらす所のビニールパイプ方式の代りに樋方式を採用し非対称分岐管を水平流管路水平面に取付けた場合について実験した結果を示すものである。

## 2. 実験装置および方法

(1) 前報に述べた装置を用い水平流水平面に分岐管を取付けた場合について実験を行なつた。なお実験条件は下の通りである。

固相：土岐津けい砂 6号 (平均粒径  $dp=0.21\text{mm}$ ,  
真比重  $\rho p=2.63\text{ g/cm}^3$ )

液相：水

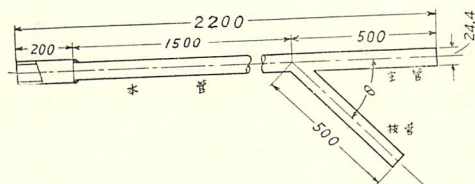
重量濃度百分率  $\alpha_1$  : 0, 5, 10, 20, 30%

流速  $u_1$  : 2~6 m/sec

分岐角度  $\theta$  : 30°, 45°, 60°, 90°

管内径  $D$  : 24.4 mm (本管, 主管, 枝管とも)

なお流速  $u_1$  は混相流の平均流速であり混相流の重量流量を容積流量に換算し管断面積で除して求めたものである。第1図に分岐管の形状を示す。



第1図 分岐管

## (2) 実験方法

攪拌用のプロペラ付き混合攪拌槽中に砂と水を任意の一定濃度で投入し、十分に攪拌した後、3 HPのサンドポンプにより、1½" パイプ、テーパ管、1" パイプを経て分岐管に混相流を流す。(分岐管の分岐点前には前駆流動区間を考慮した) 分岐した混相流はホッパー式の樋を通して混合攪拌槽に返す。定常状態に達した後受器に試料を取る。試料は本管、主管および枝管について重量濃度百分率  $\alpha$ , 管内平均流速  $u$  を求め、更に本管に対する主管の流速比  $\beta$ , 全重量比  $r$  および砂の重量比  $\delta$  を計算した。

\* 応用化学教室

## 3. 実験結果とその考察

以上の実験装置および方法で実験した結果は次の如くである。

## (1) 分散分析

前報に述べた如く分岐比は同一粒径の粒子を含む混相流に対して無次元数  $F_r$ ,  $1-\alpha_1$ ,  $\theta/180$  の関数であると考えられるが, 分岐比に対する上の三要因の効果を確かめるために  $4 \times 4$  ラテン方格処理法によつて無作為に実験データを抽出し, 分散分析を行なつた。

要因とその水準は次の通りである。

$F_r$ :  $F_{r1}$  (0~45),  $F_{r2}$  (46~90),  $F_{r3}$  (91~135),  $F_{r4}$  (136~185)

$\alpha$ :  $\alpha_1$  (5%),  $\alpha_2$  (10%),  $\alpha_3$  (20%),  $\alpha_4$  (30%)

$\theta$ :  $\theta_1$  (30°),  $\theta_2$  (45°),  $\theta_3$  (60°),  $\theta_4$  (90°)

第1表, 第2表にその一例とし  $4 \times 4$  ラテン方格処理および分散分析表を示す。

第1表  $4 \times 4$  ラテン方格処理

	$F_{r1}$	$F_{r2}$	$F_{r3}$	$F_{r4}$
$\alpha_1$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$
$\alpha_2$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_1$
$\alpha_3$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_1$	$\theta_2$
$\alpha_4$	$\theta_4$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$
$\beta$	$F_{r1}$	$F_{r2}$	$F_{r3}$	$F_{r4}$
$\alpha_1$	.760	.819	.825	.841
$\alpha_2$	.819	.817	.843	.762
$\alpha_3$	.832	.843	.764	.817
$\alpha_4$	.858	.768	.815	.830
$r$	$F_{r1}$	$F_{r2}$	$F_{r3}$	$F_{r4}$
$\alpha_1$	.765	.818	.824	.845
$\alpha_2$	.821	.822	.844	.771
$\alpha_3$	.830	.846	.772	.823
$\alpha_4$	.852	.776	.819	.845
$\delta$	$F_{r1}$	$F_{r2}$	$F_{r3}$	$F_{r4}$
$\alpha_1$	.777	.842	.862	.885
$\alpha_2$	.852	.871	.882	.799
$\alpha_3$	.864	.886	.795	.866
$\alpha_4$	.893	.802	.847	.874

上表により分岐比  $\beta$ ,  $r$ ,  $\delta$  は何れも  $\theta$  に対してのみ危険率1%で有意である。すなわち分岐角度の変化によつて分岐比が大きい影響を受けることが分り,  $F_r$ ,  $1-\alpha_1$  によつては変るということは云えない事が分る。

(2) 分岐比対  $F_r(1-\alpha_1)$  (パラメータ  $\theta$ )

第2表 分散分析表

$\beta$	$d.f$	$S.S$	$M.S$	$F$	判定
$\alpha$	3	135.19	45.06	1.83	**
$F_r$	3	84.19	28.06	1.14	
$\theta$	3	14978.69	4992.90	203.29	
$E$	6	147.37	24.56		
計	15				
$r$	$d.f$	$S.S$	$M.S$	$F$	判定
$\alpha$	3	240.25	80.03	4.72	**
$F_r$	3	98.25	32.75	1.93	
$\theta$	3	12753.75	4251.25	250.66	
$E$	6	101.75	16.96		
計	15				
$\delta$	$d.f$	$S.S$	$M.S$	$F$	判定
$\alpha$	3	386.69	125.56	3.26	**
$F_r$	3	241.69	80.56	2.09	
$\theta$	3	19483.19	6494.40	168.77	
$E$	6	230.87	38.48		
計	15				

データを整理するに当つてまず無次元数  $F_r$ ,  $1-\alpha_1$ ,  $\theta/180$  の中で  $F_r(1-\alpha_1)$  なる無次元数の積を混相流が管路を流動する場合の流動条件変数として採用した。すなわち実験して得られた分岐比  $\beta$ ,  $r$ ,  $\delta$  は  $\theta$  をパラメーターとして  $F_r(1-\alpha_1)$  に対してプロットした。 $\theta=30^\circ$  の場合のデータを第2図に示す。

第2図より分る如く流動条件  $\alpha_1=0\sim30\%$ ,  $u_1=2\sim6\text{m/sec}$  の範囲では  $F_r(1-\alpha_1)$  が変わつても分岐比  $\beta$ ,  $r$ ,  $\delta$  は変るとは云えない。むしろ前報に記した外部的要因による誤差を考慮すれば分岐比は一定であると考えられる。この事は分岐角度  $\theta=30\sim90^\circ$  についても同様であり (1) の結果を裏書きしていることが分る。

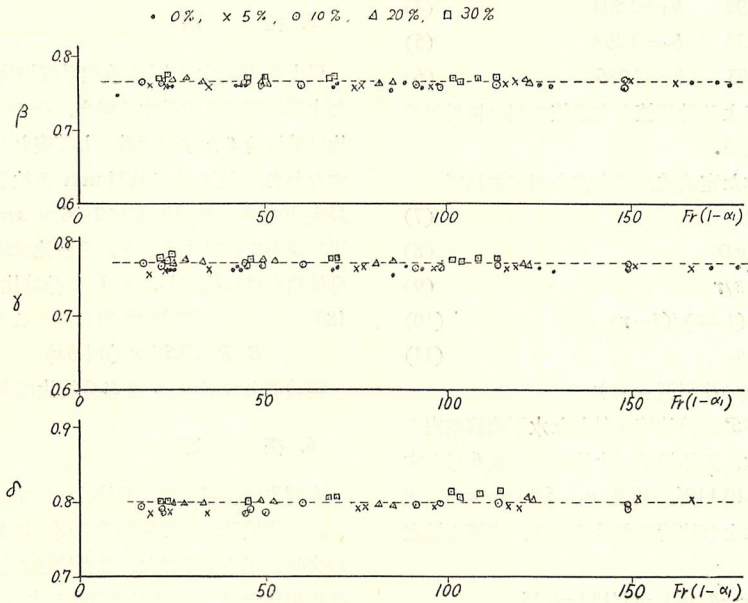
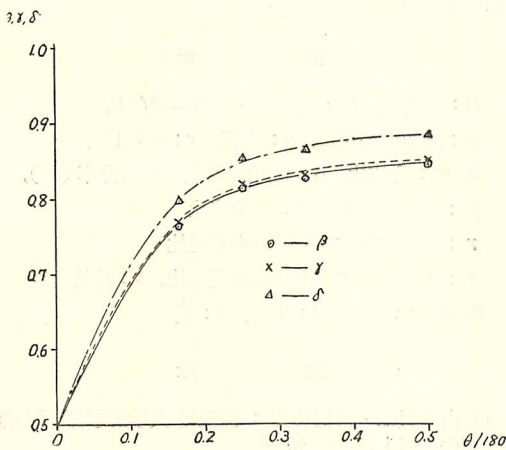
(3) 分岐比対  $\theta/180$ 

(2) で分岐比は流動条件が変わつても分岐角度が一定なら一定値を示すことが分つたが, 次に分岐角度の分岐比に対する影響を調べてみると大きく影響することが分る。第3図に  $\beta$ ,  $r$ ,  $\delta$  対  $\theta/180$  をプロットしたものを示す。図より分る如く,  $\theta=0^\circ$  の時は分岐比は何れも0.5であり分岐角度が大になれば分岐比も大になつていくことが分る。そして  $\theta=90^\circ$  では分岐比は大体一定となり0.85~0.9の附近の値を取る。

## (4) 考察

(1) (2) (3) より本実験では分岐角度  $\theta$  によつて大




第2図  $\beta, \gamma, \delta$  対  $Fr(1-\alpha_1)$  ( $\theta=30^\circ$ )

第3図  $\beta, \gamma, \delta$  対  $\theta/180$ 

きく影響され流動条件によつては変化しないということが分つた。これは本実験の実験条件の範囲、すなわち粒子径が 0.21 mm と比較的小さい粒子を、重量百分率で最大 30% 含んだ固-液系混相流が 2~6 m/sec の流速範囲で水平管路内を流動する時にしか成立しない。この範囲では流れは完全な乱流であり粒子径も小さいので粒子は浮遊状態で流体中に大略均一に分散して流れている事が考えられる。この場合は極端に大きい粒子径とか、非常に小さい流速の場合の如く粒子群が管底に沈降して不均質な混相流として流動する場合

と異なり、粒子群が流体に対して一定の相対速度（スリップ速度）をもつ均質な混相流であると考えることができる。

従つて混相流が均質な条件をもつ間は恰も清水だけの流動と類似して流動条件が変化しても分岐角度が一定であれば分岐比は一定となるのではないかと考えることができる。

また分岐角度が大になれば混相流およびその中の固体粒子はそれ自身の慣性により枝管に行きにくくなりその結果分岐比が大になるものと考えられる。 $\theta=90^\circ$  では分岐比は 0.9 未満であるので分岐角 90° 以上の実験が更に必要となる。

#### 4. 実験式

前述の如く分岐比は一般に無次元数  $Fr, 1-\alpha_1, \theta/180$  などによつて表わされるが、同一粒径の粒子を含む水平管路を流動する混相流の場合は、 $\theta/180$  だけの関数であることが明らかとなつた。

今、分岐比を  $B, R$  で表わすこの場合は

$$B, R = f(\theta/180) \quad (1)$$

第3、図より次の如き実験式が想定される。

$$B, R = 0.5 + x/(a + bx) \quad (2)$$

$$\text{ただし } x = \theta/180 \quad (3)$$

$\beta, \gamma, \delta$  についての定数  $a, b$  の値は次の如くである。ただし  $\theta=30 \sim 90^\circ$

$$a_{\beta}=0.1890 \quad b_{\beta}=2.504 \quad (4)$$

$$a_{\gamma}=0.1830 \quad b_{\gamma}=2.498 \quad (5)$$

$$a_{\delta}=0.1563 \quad b_{\delta}=2.286 \quad (6)$$

なお、実験式による計算値と実験値の間の相対誤差は約5%以内である。

また前報に述べた定義式、基礎式を列記すれば

$$u_2/u_1=\beta \quad (7)$$

$$F_r=u_1^2/gD \quad (8)$$

$$\alpha_2/\alpha_1=\delta/r \quad (9)$$

$$\alpha_3/\alpha_1=(1-\delta)/(1-r) \quad (10)$$

$$u_1=u_2+u_3 \quad (11)$$

次に上述の諸式の使用例を示す

(例) 分岐角  $45^\circ$  の分岐管を付した水平流管路内を混相流(液相は水、固体粒子は土岐津けい砂6号とする)が濃度  $\alpha_1=10.14\%$ 、流速  $u_1=5.20 \text{ m/sec}$  で流れている。主管および枝管における濃度、流速を推定せよ。

(解) (3)より  $x=\theta/180=45/180=0.25$

(2), (4)より  $\beta=0.5+0.25/(0.189+2.504 \times 0.25)=0.8067$

(2), (5)より  $r=0.5+0.25/(0.183+2.498 \times 0.25)=0.8104$

$$\delta=0.5+0.25/(0.1563+2.286 \times 0.25)=0.8435$$

(7)より  $u_2=u_1 \times \beta=5.20 \times 0.8067=4.19 \text{ (m/sec)}$

(11)より  $u_3=u_1-u_2=5.20-4.19=1.01 \text{ (m/sec)}$

(9)より  $\alpha_2=\alpha_1 \times \delta/r=10.14 \times 0.8435/0.8104=10.55(\%)$

(10)より  $\alpha_3=\alpha_1 \times (1-\delta)/(1-r)=10.14 \times (1-0.8435)/(1-0.8105)=8.37(\%)$

なお、実測値は  $u_2=4.23(\text{m/sec})$ ,  $u_3=0.95(\text{m/sec})$ ,  $\alpha_2=9.41(\%)$ ,  $\alpha_3=8.00(\%)$  であつた。

## 5. 結 語

以上を要約すると固-液相系混相流が分岐管を付した水平流管路を流動する場合、その特性としての分岐比は分岐角  $\theta$  だけの関数として表わせる事が分つた。すなわち、粒子径が  $0.21 \text{ mm}$  の粒子を重量百分率で最大  $30\%$  含んだ混相流が  $2 \sim 6 \text{ m/sec}$  の流速範囲で水平管路内を流動するとき、分岐比は流動条件によらず分岐角だけに依存し、そして分岐比  $B. R.$  は  $x=\theta/180$  と次の如き実験的相関があることが考えられる。

$$B. R.=0.5+x/(a+bx)$$

実験によつて  $a, b$  を各分岐比に対して決定した。

## 6. 後 記

本報告は前報に続く分岐管に関する研究の一部であり、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。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、井手 義弘、古木 喬、萩之内茂樹、木場義孝、徳田雅寛、深水義弘の六君の労を謝すものである。

## 記 号

$D$ : 管内径,  $F_r$ : 管フルード数  $=u^2/gD$ ,  
 $g$ : 重力の加速度,  $u$ : 流速,  $x=\theta/180$ ,  
 $B. R.$ : 分岐比,  $\alpha$ : 固相の重量濃度百分率(%),  
 $\beta$ : 本管に対する主管の流速比  
 $r$ : 本管に対する主管の全重量比  
 $\delta$ : 本管に対する主管の砂重量比,  $\theta$ : 分岐角度  
 Suffix 1: 本管, 2: 主管, 3: 枝管

## 文 献

- 1) 山下貞二・吉福功美: 鹿児島大学工学部研究報告, 第1号(昭36)