

# 混相流に関する研究 (第6報)

ガンマ線透過法による固液混相流の  
濃度分布の測定 (その2)

山下貞二・吉福功美

(受理 昭和39年5月30日)

## THE STUDY ON THE FLOW OF MULTI-PHASE (REPORT 6)

ON THE MEASUREMENT OF THE CONCENTRATION  
DISTRIBUTION OF THE FLOW CONTAINED SOLID-  
LIQUID PHASE BY THE GAMMA-RAYS PENETRATION  
METHOD (TWO)

Sadaji YAMASHITA, Isami YOSHIFUKU

In the preceding report, the calculating formula to measure the concentration distribution in the packed column which contains solid-air and solid-water mixtures by the method of the gamma-rays penetration was derived.

In the present report, this method was applied to the flow through pipe which contains solid-water mixture, and it was found that the concentration distribution was uniform within pipe in the flow condition of relatively low concentration and moderate velocity.

From the experimental result, the slip velocity and the error analysis were discussed together.

### 1. 緒言

前報<sup>1)</sup>では固気、固液混合物の静止充填層における管内空間率分布をガンマ線透過法によつて測定し、その中で混合吸収係数  $\mu_m$ , Build-up factor  $B$  を定義し、空管の場合および管が混合物からなるときの透過ガンマ線の強さ  $I_a$ ,  $I_m$  および透過距離  $t$  の間に次のような実験的相関を見出した。空間率を  $\epsilon$  とする。

$$I_m = I_a \cdot B \cdot \exp(-\mu_m t) \quad (1)$$

ここに  $\mu_m = \mu_s(1-\epsilon) + \mu_{a,w} \cdot \epsilon - \mu_a \quad (2)$

そして  $\log B = a \log t \quad (3)$

スリット横幅  $\delta = 5 \text{ mm}$  の実験では

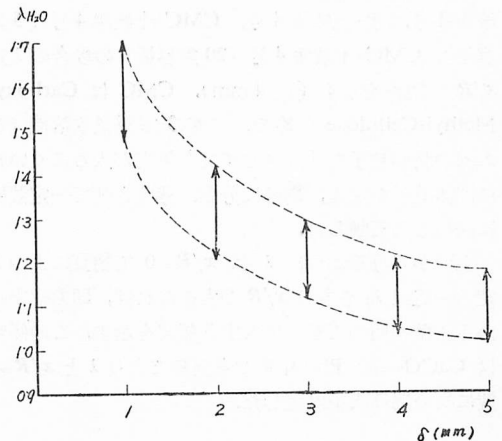
$$\lambda \equiv a / \mu_m \doteq 1.0 \quad (4)$$

本報ではスリット横幅  $\delta$  を変化したときの  $\lambda$  の変化、および物質による  $\lambda$  の変化について調べ、更に管壁効果を小さくするための補正式を求め、これらの式を使用して実際に管内を固液二相流が一定濃度、一定流速で上昇管路を流動するときの管内の空間率分布についての計算結果その他について述べる。

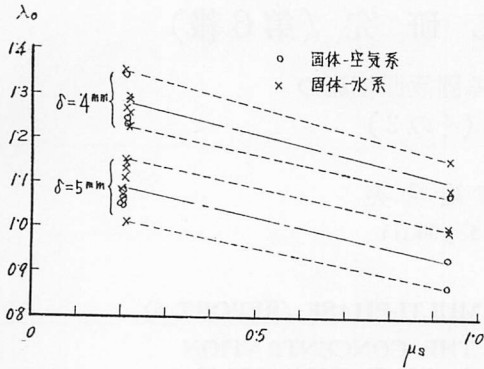
### 2. 計算式と予備実験

#### (1) $\lambda$ のスリット横幅 $\delta$ による変化

前報では  $\delta = 5 \text{ mm}$  の場合  $\lambda \doteq 1.0$  であつたが、これは近似的にしか成立せず厳密には物質によつて、又管内位置  $x/R$  によつて変化する。第1図に管内が水だけからなる場合の  $\lambda$  の値 ( $\lambda_{\text{H}_2\text{O}}$ ) とスリット横幅  $\delta$



第1図  $\lambda_{\text{H}_2\text{O}}$  対  $\delta$



第2図  $\lambda_0$  対  $\mu_s$

との間の関係を示す。この図から  $\delta$  が大になれば  $\lambda_{H_2O}$  は小となること、および一定の  $\delta$  に対して  $\lambda_{H_2O}$  の値が相当ばらつく(管内位置によるもの)ことが分る。このことは混合物の場合の  $\lambda$  についても同様である。第2図に混合物中の固体の吸収係数  $\mu_s$  に対して  $\delta=4, 5$  mm の場合についての  $\lambda_0$  (管中心  $x/R=0$  における  $\lambda$  の値) の関係を示す、この図から  $\delta$  の大きい 5 mm の方が  $\lambda_0$  は小で、又一定の  $\delta$  に対して  $\mu_s$  が大きい方(この場合鉛丹)が  $\lambda_0$  は小であることが分る。

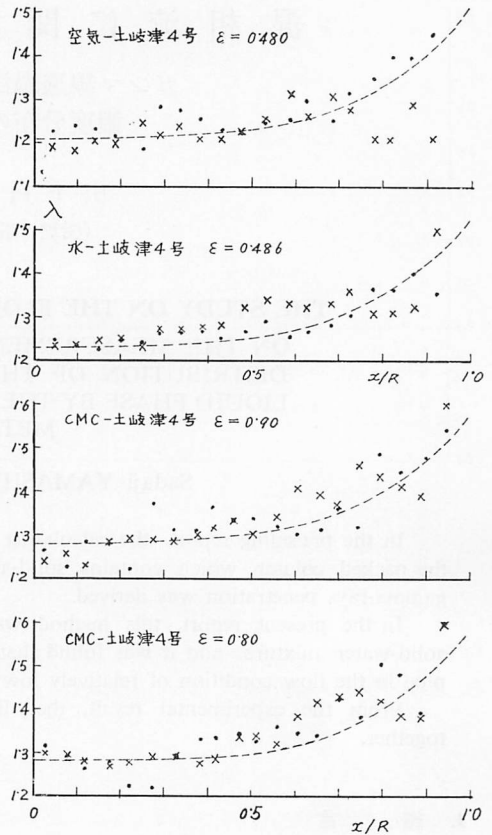
しかるに誤差解析によると一般に  $\lambda$  の値は小さいほど誤差が小となるので、上述のことから  $\delta$  は大きいほど良いことになる。しかしながら  $\delta$  が余り大きいときは管内の濃度分布の測定、とくに管端における測定に対しては好ましくない。従つて本実験においては  $\delta=4$  或は 5 mm を採用することにした。

(2)  $\lambda$  の管内位置  $x/R$  に対する補正

次に  $\lambda$  は混合物系が一定で、 $\delta$  が一定であつても管内位置によつて変化する。第3図に混合物が空気-土岐津4号、水-土岐津4号、CMC-土岐津4号(5%容量)、CMC-土岐津4号(20%容量)の場合の  $\lambda$  対  $x/R$  の関係を示す( $\delta=4$  mm)。CMCはCarboxy-Methyl-Celluloseの略で、この3%重量水溶液(この%の時が粒子を沈降させず又空気泡が入りにくい)に固体粒子を混入、均等に分布、懸濁させて一定濃度に保持して実験した。

上図から分るように  $\lambda$  は  $x/R=0$  で物質によつて定る一定値  $\lambda_0$  を取り  $x/R$  が大になれば、即ち管中心から管壁に向つて漸次増大する傾向を示す。この傾向は  $CaCO_3$  系、 $Pb_3O_4$  系でも同様であり  $\lambda$  と  $x/R$  の間に次の関係式を仮定した。

$$\lambda = \lambda_0 + m(x/R)^n \quad (5)$$



第3図  $\lambda$  対  $x/R$

$\lambda_0$  は物質によつて定り  $\mu_s$  が大になれば小さい値を取り平均値として

$$\delta=4 \text{ mm} : \lambda_0(SiO_2) = \lambda_0(CaCO_3) = 1.28$$

$$\lambda_0(Pb_3O_4) = 1.11$$

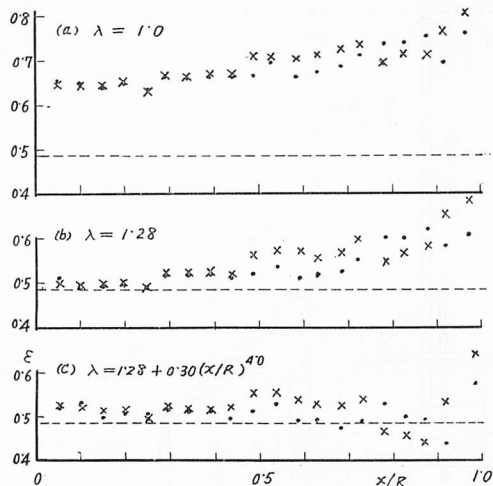
$$\delta=5 \text{ mm} : \lambda_0(SiO_2) = \lambda_0(CaCO_3) = 1.09$$

$$\lambda_0(Pb_3O_4) = 0.93$$

であつた。又右辺第2項は物質によつて変らず管壁効果であり、 $SiO_2, CaCO_3, Pb_3O_4$  系についての実験データから

$$\delta=4 \text{ mm} : m=0.30, n=4.0$$

第4図に  $\delta=4$  mm、水-土岐津4号系の場合について a)  $\lambda=1.0$ , b)  $\lambda=\lambda_0=1.28$ , c)  $\lambda=1.28+0.30(x/R)^{4.0}$  を用いて計算した  $\epsilon$  と  $x/R$  の関係を示す。この図から (a), (b) よりも (c) の場合が空間率の実測値  $\epsilon_{meas}=0.486$  に大体近く、均等であることが分るが、それでも管壁付近ではばらつきがあることが分る。



第4図  $\epsilon$   $x/R$  (水-土岐津4号,  $\epsilon=0.486$ )

(3) 予備実験

次に前述の  $\lambda$  の関係式を用いて CMC 水溶液中に均等に分散，懸濁した固液系の空間率分布を求めてみる。なお計算式は前報に記したが再起すると

$$\epsilon = (\mu_s - \mu_m) / (\mu_s - \mu_{a,w}) \quad (6)$$

$$\mu_m = I_n(A_a/A_m) / (t - \lambda I_n t) \quad (7)$$

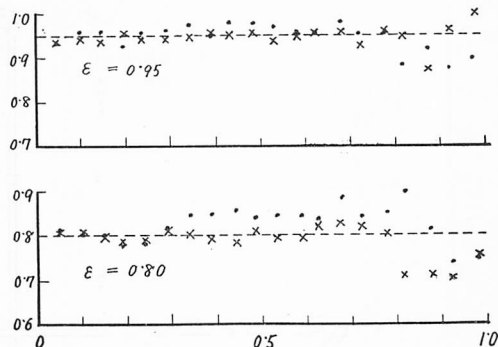
第5, 6, 7 図に CMC-土岐津4号 ( $\epsilon=0.95, 0.80$ ) 系, CMC- $\text{CaCO}_3$  ( $\epsilon=0.95, 0.80$ ) 系, CMC- $\text{Pb}_3\text{O}_4$  ( $\epsilon=0.95, 0.80$ ) 系についての  $\epsilon$  の計算値と  $x/R$  の関係を示す。

この図から吸収係数の大なる  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  系についてはデーターのばらつきが小さいが吸収係数の小さい  $\text{SiO}_2, \text{CaCO}_3$  系は誤差が大きく，又管壁付近 ( $x/R > 0.8$ ) ではかなり大きくデータがばらついていることが分る。これは円管の管壁付近ではノギスの読みの小さい誤差でも大きく影響すること，又この付近では種々の相（混合物系，管壁，管外空気など）が存在するのでガンマ線が散乱し，吸収などに対して不安定な動きを示すためではないかと考えられる。この管壁付近の誤差を小さくするには内径の大なる管を使用するか，ガンマ線源量を大にしスリットの横幅を小にするとか，検出器系の精度を大にするとか種々の対策が考えられる。

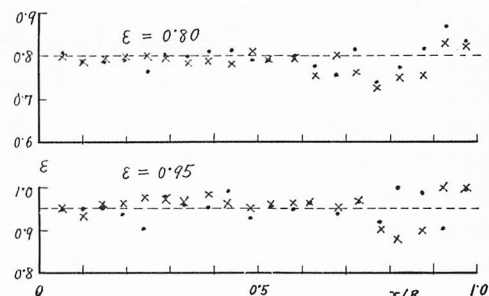
3. 管内を流動する固液混相流の空間率分布

(1) 実験装置および方法

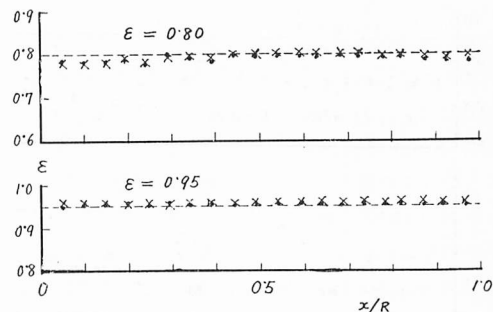
上昇管路内を一定濃度，一定流速で固液混相流が流



第5図  $\epsilon$   $x/R$  (CMC-土岐津4号)



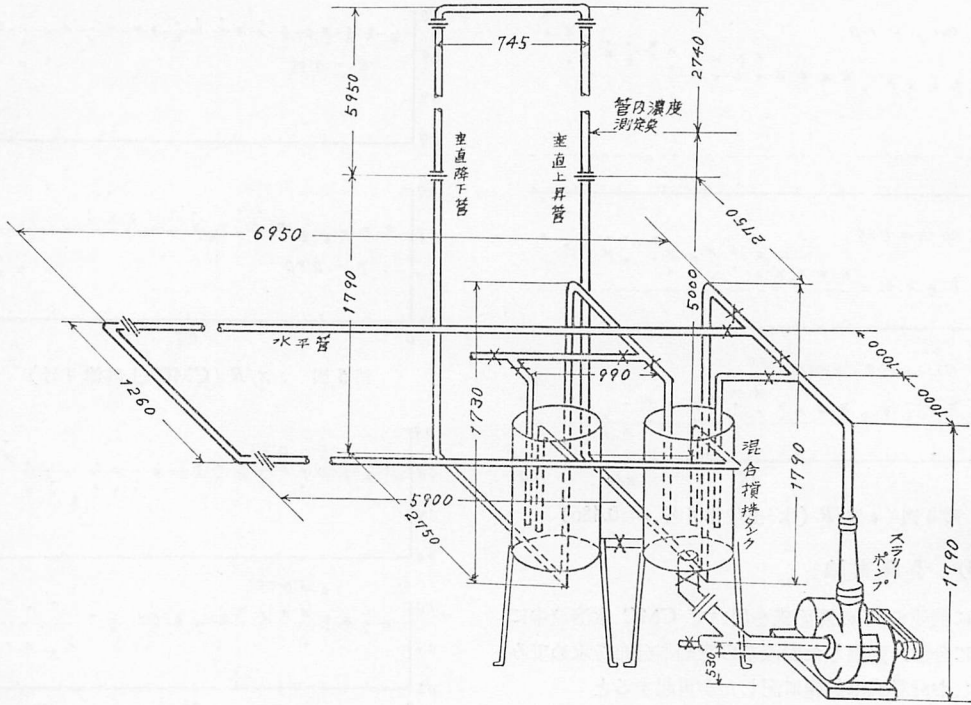
第6図  $\epsilon$  対  $x/R$  (CMC- $\text{CaCO}_3$ )



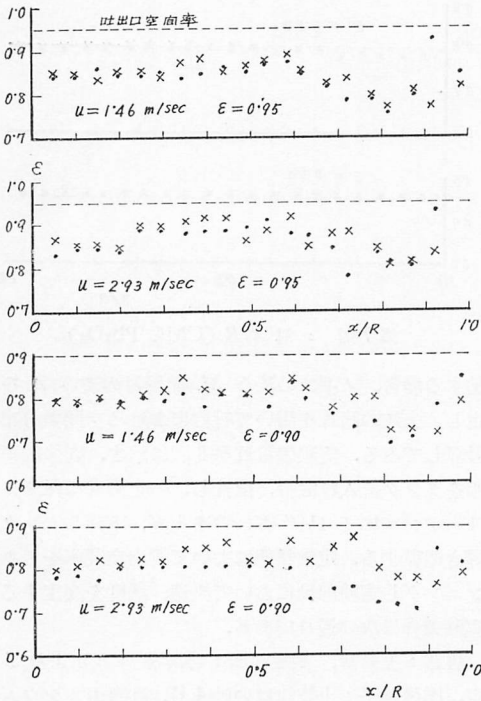
第7図  $\epsilon$  対  $x/R$  (CMC- $\text{Pb}_3\text{O}_4$ )

動する場合，ノギスの読み  $M$ ，記録計の読み  $A$  を測定し，上述の諸式を用いて管内における空間率分布を計算してみる。実験装置は第8図に示す。固体粒子と水をタンクに入れ混合，攪拌し，一定濃度に保ちスラリーポンプにて  $1\frac{1}{2}$ " ガス管を上昇，下降タンクに導き循環する。定常状態において管内空間率をスキヤニングし実験前後において流速，濃度を測定する。実験条件は次の通りである。

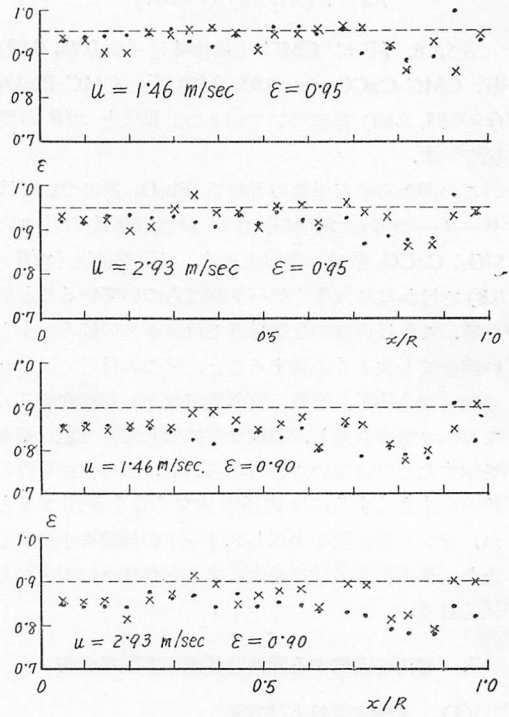
管路：上昇管，測定箇所：水平管 エルボより 5 m 点，固体粒子：土岐津けい砂4号，炭酸カルシウム，鉛丹（物性定数は前報参照），濃度（管吐出口）：5，



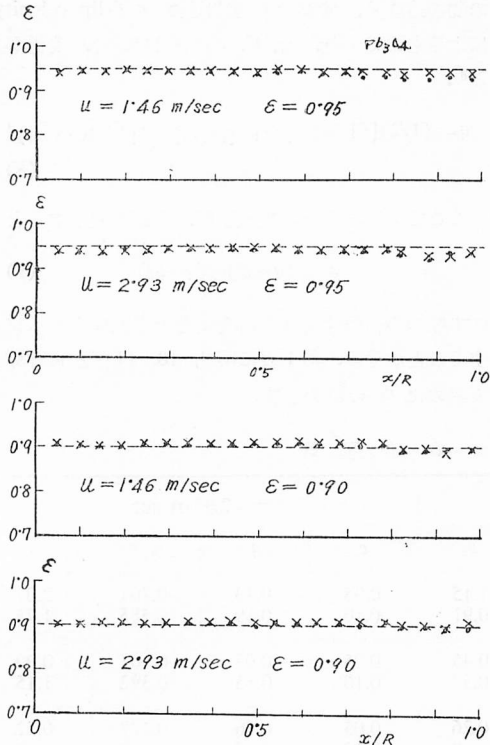
第8図 実験装置



第9図  $\epsilon$   $x/R$  (土岐津4系)



第10図  $\epsilon$   $x/R$  ( $\text{CaCO}_3$ 系)



第 11 図  $\epsilon$   $x/R$  ( $Pb_3O_4$  系)

10%容量，流速：1.46, 2.93 m/sec, スリット横幅：  
 $\delta=4$  mm.

その他ガンマ線源，コリメータ，検出器系は前報に記した Ohmart Corp. 製を用い，記録計は横河製 ER-122, 流速は電磁流量計を用いた。

(2) 実験結果

上述の方法で行なつた実験結果の計算の1例を第9, 10, 11 図に示す。この図から次のようなことが分る。

イ) 上述の実験条件すなわち比較的低濃度（5% , 10%容量）, 中流速（1.5~3 m/sec）の範囲では管壁付近を除けば空間率分布すなわち濃度分布は一様である。

ロ) 管壁付近では誤差が大でデータがばらついているので濃度分布が明らかではないが, CMC-固体系の均一, 分散懸濁液の場合のデータと比較してみると管壁付近でも大略一様であると考えられる。

ハ) 吸収係数の大なる粒子を含む系 ( $Pb_3O_4$  系) ではデータのばらつきが小さく, 管壁付近まで濃度分布は一様である。空間率の値のばらつきを相対誤差で

表わした  $e_2$  は  $SiO_2, CaCO_3$  系：6% ,  $Pb_3O_4$  系：2%.

ニ) 吐出口における濃度（輸送濃度,  $C$  と記す）は計算して求めた管内の平均濃度（管内濃度,  $q$  と記す）と多少相異があり一般に  $C < q$  である。

(3) 実験結果の考察

上述のことは Ohmart Corp 製の放射線密度計（線源 Cs-137, 18 mc）にて 1½" ガス管内を流動する固液混相流の濃度分布を測定した結果であり，線源量の増大，検出系の改良などで精度を上昇させることにより，管壁付近の濃度分布の詳細が明らかにされるであろうと考えられるのであるが，本実験結果については次のようなことが考察される。

イ) 低濃度，中流速の範囲では濃度分布は均等，一様な結果が得られたのであるが，管内で固体粒子に濃度分布を引き起す推進力としては次の二つが考えられる。一つは剪断流れによるもの，すなわち流速分布は管内で一様でなく中心付近が流速大になるため静圧小となつて固体粒子は管中心部に押しやられると考えられる。二つは濃度差による拡散が推進力となるもので，上述の剪断流れによつて管中心部が高濃度となる結果，流速が低下し，流速大となつた管壁付近に粒子の移動が起る。これは濃度差による拡散と見なすことができる。上の二つの推進力はその働く方向が反対であり，ある流動条件（濃度，流速，固体粒子，および流体の物性定数）では平衡を保つて一定の濃度分布をなして混相流は流動するであろうと考えられる。本実験の範囲ではそれが一様な分布をなして平衡を保つたのであろうと考えることができる。

なお固液混相流の濃度分布についてはサンプリンググループを用いての H. Kada, T. J. Hanratty<sup>2)</sup> の実験（管：垂直上昇 3 in-Pyrex 管，流体：水，固体粒子：比重 2.20, 粒径 0.38, 0.10 mm のガラス球，濃度：0.5~2.5%容量，流速：0.266~0.663 m/sec）があり，管壁付近（データを欠く）を除いて一様な濃度分布を得ている。

又 B. J. Gliddon<sup>3)</sup> の紹介している Durand の実験（管：垂直上昇，内径 150 mm, 流体：水，固体粒子：粒径 0.18, 1.0, 4.36 mm の砂，流速：3~5 m/sec, 濃度 8%容量以下）でも管内で殆んど均一，一様な濃度分布を得ている。しかしながら管壁付近では測定されていない。

一方，気固混相流では Soo, Regalbuto<sup>4)</sup> の実験（管：水平 3" 管，流体：空気，固体粒子：粒径 0.23,

0.115 mm の硝子球, 流速: 50, 75, 100 ft/sec, 濃度: 0.05, 0.10, 0.151 b-solid/lb-air) では乱流の流速分布に似た管中心で濃度大なる分布を示している。なお濃度測定はサンプリング・プルーブ方式である。

従つて濃度分布についてはそれに影響する因子として流体, 固体粒子の物性定数, 流速, 濃度などの流動条件, 管路の方向, 内径その他についてのより広い範囲での実験研究が必要であり, 更にその測定方法についても深い考慮が必要であると考えられる。

#### ロ) 相対速度について

前述の如く吐出濃度  $C$  は管内平均濃度  $q$  と等しくないう結果を得たが, その差は固体粒子群と流体と

の間の速度差, すなわち速対速度  $v_t$  (slip velocity) によるものであり,  $v_t, C, q$  の間には次の関係がある<sup>3)</sup>。

$$q = (1/2)\{(1-v/v_t) + \sqrt{[(v/v_t)-1]^2 + 4C(v/v_t)}\} \quad (8)$$

ここで  $v$  は混相流の装入速度。上式を変形すると

$$v_t = (q-C)v/(q-q^2) \quad (9)$$

すなわち相対速度は吐出濃度と管内濃度の差に比例することが分る。第1表に第9, 10, 11図から計算して求めた  $v_t$  の値を示す。

第1表 相対速度の計算値

	$v = 1.46 \text{ m/sec}$				$v = 2.93 \text{ m/sec}$			
	$c$	$q$	$v_t/v$	$v_t$	$c$	$q$	$v_t/v$	$v_t$
土岐津4号	0.05	0.15	0.784	1.15	0.05	0.13	0.707	2.07
〃	0.10	0.20	0.625	0.91	0.10	0.19	0.585	1.75
炭酸カルシウム	0.05	0.07	0.307	0.45	0.05	0.07	0.307	0.90
〃	0.10	0.15	0.392	0.57	0.10	0.15	0.392	1.15
鉛丹	0.05	0.06	0.177	0.26	0.05	0.06	0.177	0.52
〃	0.10	0.10	0	0	0.10	0.10	0	0

第12~17図でデータのばらつきがあるので厳密に正確であるとはいえないが, 第1表から次のようなことが分る。

(a) 粒子の大きい粒子の方が相対速度は大きい。

(b) 吐出濃度  $C$  の小さい方が相対速度は大きい。このことは炭酸カルシウムの場合には成立たない。

(c) 同一粒径の粒子の場合, 密度の小さい粒子の方が相対速度は大きい, このことは実験誤差を考慮すると明らかではない。

(d) 混相流の流速の大きい方が相対速度は大きい。

上述のことは必ずしも正確でなく大体の傾向を示すに過ぎないがスモルジウレウの式<sup>5)</sup>

$$v_t/V_w = K(S-1)(d/D)(1-C) \quad (10)$$

と比重  $S$  について, すなわち上の (c) を除いて大体一致した結果を示している。  $d$ : 粒径,  $D$ : 管径,  $K$ : 実験的係数約 0.5,  $V_w$ : 水の流速。

なお上式の適用範囲は  $C \leq 0.15$ ,  $d/D = 0.08 \sim 0.50$ , 本実験は  $d/D = 1.587 \times 10^{-2} \sim 2.885 \times 10^{-3}$  であり, 必

ずしも (10) 式は適用できないが, 試みに (10) 式より  $K$  を求めると  $K = 23$  (土岐津4号)  $\sim 9 \times 10^3$  (炭酸カルシウム) となり, 物質によつて大きく変化する値となり一定値を示さない。相対速度については固体粒子, 流体の物性定数, 流速, 濃度など流動条件の関数として一層深い研究が必要であると考えられる。

#### 4. 誤差解析について

##### (1) 緒言

放射線透過法による channel 中の空間率測定についての研究はあるが誤差解析については少ない。

三輪<sup>6)</sup>は放射線利用工業計測器の精度に及ぼす各因子を論じ最適設計方式を与えている。Hooker と Popper<sup>7)</sup> は flow channel 中の水蒸気-水混合物の空間率測定において誤差解析を行ない, エレクトロニクス系における誤差, 測定技術における誤差, 放射線源の崩壊から生ずる誤差などについて研究を行なっている。本報告は固-気, 固-液混合物の管内における空間率分布のガンマ線透過法による測定における誤差解析について述べる。

## (2) 計算式

$$x = M - M_0 \quad (14)$$

前報より固-気、固-液混合物の管内位置  $x$  (管中心からの距離) における空間率  $\epsilon$  は次式で与えられる。

$$\epsilon = (\mu_s - \mu_m) / (\mu_s - \mu_{a,m}) \quad (11)$$

更に  $\mu_m$  はガンマ線ビームの透過距離  $t$ , 記録計の読み  $A$  によつて

$$\mu_m = I_n(A_u/A_m) / (t - \lambda_n t) \quad (12)$$

ここで  $t$  は次式で与えられる。  $M$  はノギスの読み

$$t = 2\sqrt{R^2 - x^2} \quad (13)$$

我々の測定する量は  $M$  と  $A$  であるが、もしノギスの読みに  $\Delta M$  だけの誤差が生じ、又放射線源の崩壊からの誤差およびエレクトロニクス系からの誤差によつて記録計の読みに  $\Delta A$  だけの誤差が生じたとすると、上式から計算して得られた  $\epsilon$  に  $\Delta\epsilon$  の誤差が生ずることになる。しかるときは  $\epsilon$  の最大相対誤差  $(\Delta\epsilon/\epsilon)_{\max}$  は次式で表わすことができる。

$$(\Delta\epsilon/\epsilon)_{\max} = G_M(x) \cdot (\Delta M/M) + G_A(x) (\Delta A/A) \quad (15)$$

ここに

$$G_M(x) = \frac{I_n(A_u/A_m)}{\mu_s - \mu_m} \cdot \frac{2\sqrt{R^2 - x^2} - \lambda}{(2\sqrt{R^2 - x^2} - \lambda_n) 2\sqrt{R^2 - x^2}} \cdot \frac{x(M_0 + x)}{(R^2 - x^2)} \quad (16)$$

$$G_A(x) = \frac{1}{\mu_s - \mu_m} \cdot \frac{2}{2\sqrt{R^2 - x^2} - \lambda_n (2\sqrt{R^2 - x^2})} \quad (17)$$

(15) 式を変形して

$$(\Delta\epsilon/\epsilon)_{\max} = G_A(x) \cdot (\Delta A/A) \{1 + R(x)\} \quad (18)$$

ただし

$$R(x) = [GM(x)/G_A(x)] \cdot (\Delta M/M) \cdot (A/\Delta A) \\ = \frac{\Delta M/M}{\Delta A/A} \cdot \frac{I_n(A_u/A_m) \cdot (2\sqrt{R^2 - x^2} - \lambda) \cdot x(M_0 + x)}{2 \cdot (2\sqrt{R^2 - x^2} - \lambda_n) 2\sqrt{R^2 - x^2} \cdot (R^2 - x^2)} \quad (19)$$

従つて  $R(x) > 1$  ならば  $M$  の誤差が  $A$  のそれより大きく影響を及ぼすことを意味し、 $R(x) < 1$  ならば上の逆となる。

## (3) 計算結果と考察

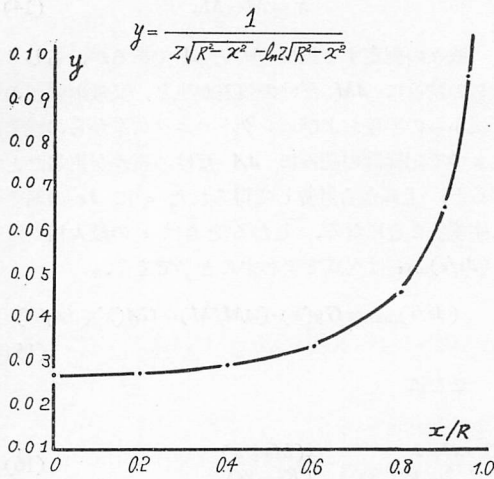
今1例として水-土岐津4号系  $\epsilon_{\text{meas}} = 0.478$  の場合を考える。この場合  $A = 6.51 \sim 7.92$ ,  $M = 26 \sim 30$  (cm) であり、記録計の読みの1目盛は0.1で実験中の指針のふらつきより  $\Delta A = 0.5 \times 10^{-1}$ , 又ノギスの読みの1目盛は  $1 \text{ mm} = 10^{-1} \text{ cm}$  であり、副尺にて  $1/20 \text{ mm}$  まで読みとれるが  $\Delta M = 1/10 \text{ mm} = 10^{-2} \text{ (cm)}$  とする。

これらの値を(19)式に代入して  $R(x)$  を求めると、 $x/R = 0.096 \sim 0.913$  に対して  $R(x) = 1.96 \times 10^{-2} \sim 2.27 \times 10^{-1}$  の値を示した。すなわち  $R(x) < 1$  であり記録計の読みの誤差が大きく影響すると考えてよい。他の場合でも計算結果は同様で近似的に

$$(\Delta\epsilon/\epsilon)_{\max} \doteq G_A(x) (\Delta A/A) \quad (20)$$

とおいてよいことが分つた。従つて  $(\Delta\epsilon/\epsilon)_{\max}$  を減少するためにはエレクトロニクス系の改良などによつて

( $\Delta A/A$ ) を減少するか、或は  $G_A(x)$  を減少せねばならない。 $G_A(x)$  についていえば  $\mu_s - \mu_m$  が大きい程、すなわち鉛丹系の方が誤差が小となることが分る。このことは前述の実験結果と一致している。又  $\lambda$  は大きい程実験誤差は小となる。次に管壁付近についてであるが、第12図に  $y = 1 / (2\sqrt{R^2 - x^2} - \lambda_n 2\sqrt{R^2 - x^2})$  対  $x/R$  の関係を示している。これは  $G_A(x)$  対  $x/R$  の関係と相似であり、この図から管壁付近、すなわち  $x/R$  が1に近いところでは  $G_A(x)$  が大となり、従つて誤差が大となることが分る。すなわち上述の計算式に従つて管内の空間率分布を求める場合、管壁付近に近づくに従つて空間率の計算値が大きくばらついてくことはさけることができない。これを改良するにはエレクトロニクス系の改良、放射線源の増大などの手段の他に、ビームの横幅をせまくする(しかしながら  $\lambda$  が大となり誤差が大となるので制限がある)とか、円管でなく角管を使用するとか等が考えられる。この測定技術の進歩が今後大いに望まれるところである。



第 12 図

## 5. 結 言

前報に引続き固液混相流が上昇管路を一定濃度、一定流速で流動するときの管内における濃度分布をガンマ線透過法によつて測定するための計算式を予備実験で求め、その結果  $\lambda$  は  $\lambda = \lambda_0 + m(x/R)^n$  の形で表わすことができた。右辺第1項は物質の吸収係数によつて定る定数、第2項は管壁効果を表わす。スリット横幅  $\delta = 4 \text{ mm}$  の場合について  $\lambda_0, m, n$  を実験的に求め、それらの諸式を用いて比較的低濃度、中流速で流れる土岐津けい砂4号、炭酸カルシウム、鉛丹を固体粒子とする固液混相流についての管内の濃度分布の計算値から次のようなことが分つた。(1) 吸収係数の小さい系 ( $\text{CaCO}_3, \text{SiO}_2$ ) では誤差が大きく、吸収係数の大きい系 ( $\text{Pb}_3\text{O}_4$ ) では誤差は小さいが管内の濃度分布は大体一樣である。管壁付近では正確ではないが一樣とみなしてよいと考えられる。(2) 吐出濃度と管内濃度とは一般に相違があり、これは固体粒子群と流体との間の相対速度によるものである。そしてこの相対速度の大きさは計算式で求めることができるが、その傾向は文献と大体一致することが分つた。

次に上述の計算式を用いて管内の濃度分布を求める場合の誤差解析をなし、 $\lambda$  の値や管内の位置がいかに

データのばらつきに影響があるかを考察した。

## 後 記

本研究は茨城県東海村日本原子力研究所においてなされたもので、原研化学工学研究室の当時の室長山本寛博士、副主任研究室山崎弥三郎氏、および化学工学特別研究室の諸氏に深く感謝の意を表します。

(昭和37年10月 日本機械学会、第40期全国大会で講演)

## 文 献

- 1) 山下貞二・吉福功美：鹿児島大学工学部研究報告。第3号，75 (1963)。
- 2) H. Kada, T. J. Hanratty, A. I. Ch. E. Journal. VOL. 6, No. 4624 (1960)。
- 3) B. J. Gliddon, J. Imp. Coll. Chem. Eng. Soc, 11: 152 (1957)。
- 4) S. L. Soo, J. A. Regalbuto, Can. J. Chem. Eng., VOL. 38: 160 (1960)。
- 5) 池森亀鶴：日本機械学会誌，VOL. 66: No. 537, 1417 (1963)。
- 6) 三輪博秀：アトーム研究科用総覧（日本原子力産業会議），45 (1956)。
- 7) H. H. Hooker, G. F. Popper, ANL-5766 (1958)。

## Appendix

固液系混相流ではその濃度を表わすのに種々の方式がある。次に濃度、密度、空間率などの関係式を記す。

$\alpha$  : 重量濃度 (kg-solid/kg-total)

$c$  : 容積濃度 ( $\text{m}^3\text{-solid}/\rho_s\text{-total}$ )

$\epsilon$  : 空間率 ( $\text{m}^3\text{-void}/\text{m}^3\text{-total}$ )

$\rho$  : 密度 (kg-total/ $\text{m}^3\text{-total}$ )

$\rho_s$  : 固体粒子の密度 (kg-solid/ $\text{m}^3\text{-solid}$ )

$\rho_w$  : 水の密度 (kgH<sub>2</sub>O/ $\text{m}^3\text{-H}_2\text{O}$ )

$k$  :  $k = (\rho_s - \rho_w) / \rho_s$

(1)  $c \sim \epsilon$ ,  $c = 1 - \epsilon$ ,  $\epsilon = 1 - c$

(2)  $\epsilon \sim \rho$ ,  $\epsilon = (1/k)(1 - \rho/\rho_s)$ ,  $\rho = \rho_s(1 - k\epsilon)$

(3)  $\alpha \sim \epsilon$ ,  $\alpha = (1 - \epsilon)/(1 - k\epsilon)$ ,  $\epsilon = (1 - \alpha)/(1 - k\alpha)$

(4)  $\alpha \sim c$ ,  $\alpha = c/[1 - k(1 - c)]$ ,  $c = \alpha(1 - k)/(1 - k\alpha)$

(5)  $c \sim \rho$ ,  $c = (\rho - \rho_w)/(\rho_s - \rho_w)$ ,  $\rho = c(\rho_s - \rho_w) + \rho_w$

(6)  $\alpha \sim \rho$ ,  $\alpha = (1/k)(1 - \rho_w/\rho)$ ,  $\rho = \rho_w/(1 - k\alpha)$