鉛直管内固体流体系混相流の各相体積率に対する推算式*

Correlations for Volumetric Fractions of Each Phase of Developed Steady Solid-Fluids Multiphase Flows in Vertical Pipes

坂口 忠司**

吉永 俊雄***

SAKAGUCHI Tadashi

YOSHINAGA Toshio

Abstract A general correlation has been proposed to estimate various flow characteristic quantities of developed gas-liquid two-phase steady flows, such as void fraction, lengths of large bubble and passing frequency of large bubble in slug flows, film thickness in annular flows, and so on. The concept used in this derivation is extended to derive correlations for volumetric fractions of each phase in developed steady solid-fluids multiphase flows. Empirical correlations are proposed for volumetric fractions of each phase in liquid-solid two-phase flows, and in gas-liquid-solid three-phase flows using experimental data obtained from various kinds of experimental conditions.

Keywords: Correlation, Empirical correlation of volumetric fraction, Liquid-solid two-phase flow, Gas-solid two-phase flow, Gas-liquid-solid three-phase flow

1. 緒言

著者の1人は、これまでに[1-4]、等温、定常、発達流れ状態の鉛直管内気液二相流の各種流動特性量を同一形式の推算式で推算することを試み、体積率、大気泡の長さなどの実験データの推算値と実験値を比較した。本研究では、同じ考えに基づいて、鉛直管内の固液二相流、固気二相流並びに固気液三相流の各相体積率の推算式の導出を試みた[5]。これらの推算(説明)能力は、従来の推算式に勝るとも劣らない有用な推算式である[6]。これは、本基礎概念の妥当性を実証するものとみなせるので、ここに報告する。

2. 流動特性量に対する推算式

2.1 基本的考え方と気液二相流の推算式

既報[1-4]で述べたように、等温、定常、発達流れ状態の気液二相流における各種流動特性は、

与えられた装置の配置、幾何学的形状と寸法などの流路条件、流路へ供給される両相の種類、両相流量、圧力や温度などの流動条件のみによって決まると考える。この考えが成り立つ範囲内において、両流体の密度、粘度並びに表面張力の物性値、流路条件と流動条件から成る一組の入力物理量群とその各種流動特性の測定値は、ばらつきを伴いながらも、1対1の関係で結ばれ、両者の間には一義的な因果関係がある。この考えが、本研究の基礎となる概念である[1-4]。

この基礎概念に基づいて導いた気液二相流の推算式の一例である気相体積率 α_G は、体積流量 J 、粘度 μ 、密度 ρ 、重力加速度 g 、管径 D と表面張力 σ を用いて、次式で表される[2]。

$$\alpha_G = A (J_G/J_{GL})^a (J_L/J_{GL})^b (\mu_G/\mu_L)^c (\rho_G/\rho_L)^f [J_{GL}/(gD)^{0.5}]^h (\rho_L D J_{GL}/\mu_L)^k (\rho_L D J_{GL}^2/\sigma)^m + B \quad (1)$$

* 2005. 7. 14 受付

** 神戸大学名誉教授 〒651-2276 神戸市西区春日台町 3-1-2-703

TEL, FAX: (078) 961-2245 E-mail: t-sakaguchi@mve.biglobe.ne.jp

*** 西日本工業大学機械システム工学科

ここで、 $J_{GL}=J_G+J_L$ であり、添字 G と L は気相と液相を表す。このべき乗積型を用いたのは、試行した種々の式の中で、最も推算精度が高かったためである。その際、有次元の入力物理量を直接使った場合、両辺の次元を一致させるのが難しいので、流動特性量と入力物理量群とをおのおの無次元量で表すこととした。

式中の指数を表す記号の使い方はこれ以後の式においても任意であり、定数 A 、 B と同様にそれぞれの式において値は異なる。定数 B は、後述する誤差指標 ID を最小にするために付加した。

2.2 固気液三相流の体積率に対する推算式

上述の気液二相流に対する推算式を、固気液三相流に対して適用した結果について述べる。なお、気相と液相には各 1 種類の流体を用い、固相には同一種類(同じ材質・形状・寸法)の固体粒子を用いる場合を対象とする。

固気液三相流の入力物理量は、気相体積流量 Q_G (m³/s)、液相体積流量 Q_L (m³/s)、固相体積流量 Q_P (m³/s)、気相粘度 μ_G (Pa·s)、液相粘度 μ_L (Pa·s)、気相密度 ρ_G (kg/m³)、液相密度 ρ_L (kg/m³)、固相密度 ρ_P (kg/m³)、表面張力 σ (N/m)、管径 D (m)、固体粒子径 d_p (m)、固体粒子の静止流体中の自由沈降終速度に対応する抗力係数 C_{DT} である。これらに加えて、重力加速度 g (m/s²) と全体積流束 $J_{GLP}(=J_G+J_L+J_P)$ (m³/m²s) を入力物理量と考えた。

本研究で提案する推算式においては、無次元化された流動特性量(例えば、各相体積率)は、固気液三相流の流動を支配する上述の 14 種類の主要入力物理量の関数となり、これらから成る 11 種類の無次元量のべき乗積で表される。そこで、式(1)に示す気液二相流を基礎に固気液三相流を考えると、各相体積率 α_i ($i=G, L, P$) の体積流束基準の推算式は次式で表される。

$$\alpha_i = A (d_p/D)^a (J_G/J_{GLP})^b (J_L/J_{GLP})^c (J_P/J_{GLP})^f (\mu_G/\mu_L)^h (\rho_G/\rho_L)^k (\rho_P/\rho_L)^m [J_{GLP}/(gD)^{0.5}]^n (\rho_L D J_{GLP}/\mu_L)^q (\rho_L D J_{GLP}^2/\sigma)^t C_{DT}^u + B \quad (2)$$

ここで、添字 P は固相を表す。なお、 (ρ_P/ρ_G) が使用されていないのは、これが $(\rho_G/\rho_L)^k (\rho_P/\rho_L)^m$ の中に含まれているからである。

2.3 固液二相流と固気二相流の体積率に対する推算式

固気液三相流の場合と同様に、固液二相流と固気二相流における固相体積率 α_P の本研究で提案

する推算式は、各々式(3)と(4)で表される。

$$\alpha_P = A (d_p/D)^a (J_L/J_{LP})^b (J_P/J_{LP})^c (\rho_P/\rho_L)^f [J_{LP}/(gD)^{0.5}]^h (\rho_L D J_{LP}/\mu_L)^k C_{DT}^m + B \quad (3)$$

$$\alpha_P = A (d_p/D)^a (J_P/J_{PG})^b (J_G/J_{PG})^c (\rho_P/\rho_G)^f [J_{PG}/(gD)^{0.5}]^h (\rho_G D J_{PG}/\mu_G)^k C_{DT}^m + B \quad (4)$$

ここで、 $J_{LP}=(J_L+J_P)$ 、 $J_{PG}=(J_P+J_G)$ である。

3. 各相体積率の推算式

以上の推算式に含まれる指数並びに定数の値は、理論的に導かれるか、実験データを用いて回帰分析などによって求められる。本研究では、理論的導出に到っていないので、実験データを用いて非線形回帰分析によって求めた[1-4]。一般的に、回帰式の評価には決定係数 R^2 [7]を用いる。 R^2 が最大になったと認められる状態での定数 A と指数の値を求めた。この様にして求めた推算値は、実験データにもばらつきがあるため、実験値と差を持つ。そこで、 N 個の実験値と推算値の一致の程度を示す評価指標として式(5)に示す誤差指標 ID [2]を導入し、その値が最小になるように定数 B の値を調整した。この際、定数 A と指数を変化させない。

$$ID = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum \left\{ \frac{(\text{実験値} - \text{推算値})}{\text{推算値}} \right\}^2} \quad (5)$$

この両操作によって求めた推算式の決定係数 R^2 が 1 に近いほど、そして ID が小さいほど、推算式の推算値は実験データを良く近似していることになる[1-4, 7]。

推算式を求める際、各入力物理量の変化幅が同等で広く、一様に粗密なく均等に分布した数多くの実験データを使用するのが望ましい。しかし、そのような実験データを収集することは難しい。本研究で使った固液二相流並びに固気液三相流の流体は、空気、水、固体粒子はアルミニウム、セラミック、アルミナセラミック製球形粒子で、その各相体積率に関連する実験データの入力物理量、無次元量の範囲などの概要を Table 1 に示す。その総数は、3139 組である[8-13]。

これらの実験データを式(2)と(3)に適用して求めた推算式と決定係数 R^2 、誤差指標 ID 、実験データ数 N を以下に示す。

(1) 固液二相流における固相体積率の推算式

$$\begin{aligned} \alpha_P = & 0.595(d_P/D)^{0.176} (J_L/J_{GLP})^{0.0603} (J_P/J_{LP})^{0.760} \\ & (\rho_P/\rho_L)^{0.216} [J_{LP}/(gD)^{0.5}]^{-0.519} (\rho_L D J_{LP}/\mu_L)^{0.0261} \\ & C_{DT}^{-0.370} - 0.00243 \quad (6) \\ R^2 = & 0.9647, \quad ID = 0.1507, \quad N = 1651 \end{aligned}$$

(2) 固気液三相流における各相体積率の推算式

各流動様式における推算式と両流動様式を統合した場合の推算式を示す。後者は、流動様式が不明の場合に、各相体積率の推算に利用できる。

(2-1) 固気液三相気泡流

$$\begin{aligned} \alpha_{GB} = & 0.00341(d_P/D)^{0.510} (J_G/J_{GLP})^{1.01} (J_L/J_{GLP})^{0.396} \\ & (J_P/J_{GLP})^{0.00426} (\mu_G/\mu_L)^{-0.144} (\rho_G/\rho_L)^{0.228} (\rho_P/\rho_L)^{3.95} \\ & [J_{GLP}/(gD)^{0.5}]^{-0.412} (\rho_L D J_{GLP}/\mu_L)^{0.480} \\ & (\rho_L D J_{GLP}^2/\sigma)^{0.0682} C_{DT}^{1.10} - 0.000850 \quad (7) \\ R^2 = & 0.9975, \quad ID = 0.05760, \quad N = 812 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{PB} = & 9.12 \times 10^{-5} (d_P/D)^{0.623} (J_G/J_{GLP})^{-0.0238} \\ & (J_L/J_{GLP})^{-0.178} (J_P/J_{GLP})^{0.838} (\mu_G/\mu_L)^{0.394} (\rho_G/\rho_L)^{0.671} \\ & (\rho_P/\rho_L)^{-8.56} [J_{GLP}/(gD)^{0.5}]^{-1.00} (\rho_L D J_{GLP}/\mu_L)^{-0.0757} \\ & (\rho_L D J_{GLP}^2/\sigma)^{0.350} C_{DT}^{-0.000320} - 0.00199 \quad (8) \\ R^2 = & 0.9830, \quad ID = 0.06622, \quad N = 812 \end{aligned}$$

(2-2) 固気液三相スラグ流

$$\begin{aligned} \alpha_{GS} = & 0.000283(d_P/D)^{-0.348} (J_G/J_{GLP})^{1.16} (J_L/J_{GLP})^{0.0946} \\ & (J_P/J_{GLP})^{-0.00184} (\mu_G/\mu_L)^{-0.256} (\rho_G/\rho_L)^{-1.01} (\rho_P/\rho_L)^{0.0884} \\ & [J_{GLP}/(gD)^{0.5}]^{0.443} (\rho_L D J_{GLP}/\mu_L)^{-0.0692} \\ & (\rho_L D J_{GLP}^2/\sigma)^{-0.108} C_{DT}^{-0.605} + 0.0639 \quad (9) \\ R^2 = & 0.9270, \quad ID = 0.05542, \quad N = 676 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{PS} = & 7000(d_P/D)^{0.285} (J_G/J_{GLP})^{-0.0478} (J_L/J_{GLP})^{-0.579} \\ & (J_P/J_{GLP})^{0.950} (\mu_G/\mu_L)^{0.350} (\rho_G/\rho_L)^{1.00} (\rho_P/\rho_L)^{0.442} \\ & [J_{GLP}/(gD)^{0.5}]^{-0.555} (\rho_L D J_{GLP}/\mu_L)^{-0.0348} \\ & (\rho_L D J_{GLP}^2/\sigma)^{-0.00193} C_{DT}^{0.114} - 0.0000205 \quad (10) \\ R^2 = & 0.9672, \quad ID = 0.1086, \quad N = 676 \end{aligned}$$

(2-3) 気泡流とスラグ流を統合した固気液三相流

$$\begin{aligned} \alpha_G = & 3.22 \times 10^{-9} (d_P/D)^{-0.291} (J_G/J_{GLP})^{0.906} \\ & (J_L/J_{GLP})^{0.0590} (J_P/J_{GLP})^{0.000772} (\mu_G/\mu_L)^{-1.19} (\rho_G/\rho_L)^{-1.13} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (\rho_P/\rho_L)^{0.0651} [J_{GLP}/(gD)^{0.5}]^{0.933} (\rho_L D J_{GLP}/\mu_L)^{1.07} \\ & (\rho_L D J_{GLP}^2/\sigma)^{-0.932} C_{DT}^{-0.509} - 0.00518 \quad (11) \\ R^2 = & 0.9939, \quad ID = 0.07655, \quad N = 1488 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_P = & 2.81 \times 10^{18} (d_P/D)^{0.183} (J_G/J_{GLP})^{0.00776} \\ & (J_L/J_{GLP})^{-0.496} (J_P/J_{GLP})^{0.835} (\mu_G/\mu_L)^{2.89} (\rho_G/\rho_L)^{1.82} \\ & (\rho_P/\rho_L)^{0.517} [J_{GLP}/(gD)^{0.5}]^{-1.97} (\rho_L D J_{GLP}/\mu_L)^{-3.15} \\ & (\rho_L D J_{GLP}^2/\sigma)^{2.36} C_{DT}^{0.0157} - 0.00198 \quad (12) \\ R^2 = & 0.9679, \quad ID = 0.1012, \quad N = 1488 \end{aligned}$$

ここで、添字 B と S は気泡流とスラグ流を表す。

4. 考 察

4.1 推算結果

式 (6)–(12) による推算値と実験値の関係を、Figs. 1–4 に示す。液相体積率の推算値は、急閉締切弁法に習って、1 より他の相の体積率の推算値を差し引いて求めた。推算値に対する実験値はばらつきも小さく、1 本の直線の周りの狭い範囲に密集していて、提示した推算式は定性的に高精度の推算式とみなせる。

定量的評価指標の一つである決定係数 R^2 [7] は、いずれも 0.92 以上で、他の定量的評価指標である誤差指標 ID は、いずれも 0.16 以下の値であった。

これら定性的並びに定量的評価結果を総合して、ここに提示した推算式の使用した実験データに対する推算能力は高いと言える。従来の諸推算式との定量的比較については、種々の定量的評価指標を導入した多角的評価法 [14, 15] の提示と共に別途報告されている [6]。

Fig. 1 Calculated values by Eq.(6) vs. Experimental results of volumetric fraction of solid phase

Table 1 Ranges of experimental conditions, physical properties of working fluids and solid particles, ranges of non-dimensional groups, related references of experimental data

Volume fraction of solid-phase of liquid-solid two-phase flow in vertical pipes Fig.1, Eq.6 $\alpha_p=0.00433-0.252$, $N=1651$ Yoshinaga(1989); Inagaki(1990); Ikehara(1994); Yang(1994); Shakutsui(1995); Minagawa(1997)											
	D m	d_p m	J_G m/s	J_L m/s	J_P m/s	μ_G Pa·s	μ_L Pa·s	ρ_G kg/m ³	ρ_L kg/m ³	ρ_p kg/m ³	σ N/m
max	0.0504	0.01004	—	2.05	0.122	—	0.00145	—	1000	3630	—
min	0.0209	0.00112	—	0.192	0.00031	—	0.000809	—	996	2270	—
	d_p/D	J_G/J_T	J_L/J_T	J_P/J_T	μ_G/μ_L	ρ_G/ρ_L	ρ_p/ρ_L	Fr	Re	We	C_D
max	0.386	—	0.998	0.154	—	—	3.64	4.1	83300	—	0.890
min	0.0222	—	0.846	0.00158	—	—	2.27	0.282	3290	—	0.407

Volume fractions of three phases of gas-liquid-solid three-phase bubble flow in vertical pipes Fig.2, Eqs.7 and 8 $\alpha_{GB}=0.00970-0.134$, $\alpha_{PB}=0.00614-0.0679$, $\alpha_{LB}=0.836-0.981$, $N=812$ Shakutsui(1995)											
	D m	d_p m	J_G m/s	J_L m/s	J_P m/s	μ_G Pa·s	μ_L Pa·s	ρ_G kg/m ³	ρ_L kg/m ³	ρ_p kg/m ³	σ N/m
max	0.0504	0.00416	0.12	1.03	0.0446	0.0000186	0.00132	1.56	1000	2400	0.0744
min	0.0209	0.00112	0.0079	0.394	0.00227	0.0000175	0.000909	1.44	997	2270	0.0721
	d_p/D	J_G/J_T	J_L/J_T	J_P/J_T	μ_G/μ_L	ρ_G/ρ_L	ρ_p/ρ_L	Fr	Re	We	C_D
max	0.135	0.165	0.978	0.0589	0.0205	0.00156	2.4	2.44	35700	538	0.890
min	0.0222	0.0148	0.812	0.00426	0.0133	0.00144	2.27	0.596	9570	77.7	0.410

Volume fractions of three phases of gas-liquid-solid three-phase slug flow in vertical pipes Fig.3, Eqs.9 and 10 $\alpha_{GS}=0.206-0.725$, $\alpha_{PS}=0.00253-0.0768$, $\alpha_{LS}=0.272-0.785$, $N=676$ Yoshinaga(1989); Inagaki(1990); Minagawa(1997)											
	D m	d_p m	J_G m/s	J_L m/s	J_P m/s	μ_G Pa·s	μ_L Pa·s	ρ_G kg/m ³	ρ_L kg/m ³	ρ_p kg/m ³	σ N/m
max	0.0504	0.00612	4	1.21	0.12	0.0000189	0.00145	1.51	1000	3630	0.0749
min	0.0209	0.00114	0.328	0.393	0.00508	0.0000175	0.000793	1.31	995	2270	0.0711
	d_p/D	J_G/J_T	J_L/J_T	J_P/J_T	μ_G/μ_L	ρ_G/ρ_L	ρ_p/ρ_L	Fr	Re	We	C_D
max	0.235	0.888	0.721	0.065	0.0237	0.00151	3.63	8.96	106000	7250	0.866
min	0.0226	0.254	0.11	0.00164	0.0121	0.00131	2.27	1.14	12300	194	0.409

Volume fractions of three phases of gas-liquid-solid three-phase flow in vertical pipes (Bubble and slug flows) Fig.4, Eqs.11 and 12 $\alpha_G=0.00970-0.725$, $\alpha_P=0.00253-0.0768$, $\alpha_L=0.272-0.981$, $N=1488$ Yoshinaga(1989); Inagaki(1990); Shakutsui(1995); Minagawa(1997)											
	D m	d_p m	J_G m/s	J_L m/s	J_P m/s	μ_G Pa·s	μ_L Pa·s	ρ_G kg/m ³	ρ_L kg/m ³	ρ_p kg/m ³	σ N/m
max	0.0504	0.00612	4.00	1.21	0.120	0.0000189	0.00145	1.56	1000	3630	0.0749
min	0.0209	0.00112	0.00790	0.393	0.00227	0.0000175	0.000793	1.31	995	2270	0.0711
	d_p/D	J_G/J_T	J_L/J_T	J_P/J_T	μ_G/μ_L	ρ_G/ρ_L	ρ_p/ρ_L	Fr	Re	We	C_D
max	0.235	0.888	0.978	0.065	0.0237	0.00156	3.63	8.96	106000	7250	0.890
min	0.0222	0.0148	0.11	0.00164	0.0121	0.00131	2.27	0.596	9570	77.6	0.409

Fig. 2 Calculated values by Eqs.(7) and (8) vs. Experimental results of volumetric fraction of gas, solid and liquid phase

Fig. 3 Calculated values by Eqs.(9) and (10) vs. Experimental results of volumetric fraction of gas, solid and liquid phase

Fig. 4 Calculated values by Eqs.(11) and (12) vs. Experimental results of volumetric fraction of gas, solid and liquid phase

4.2 推算式を構成する入力物理量の数と項数が 推算結果に及ぼす効果

本研究では、混相流の流動特性に影響すると考えられる物理量を出来るだけ多く採用して推算式を構成したので、入力物理量と項の数は、従来の混相流の推算式と比較して多い方に属する。

以下、入力物理量と項の数がもたらす効果について考察する。ここでは、項数7の固液二相流を対象とした推算式(6)を採り上げ、まず、推算式を構成している各項単独の推算式について述べる。

(1) 項数が1の場合

$$\alpha_P = 0.128(d_P/D)^{1.50} + 0.0360 \quad (13-1)$$

$$R^2 = 0.04726, \quad ID = 0.5240, \quad N = 1651$$

$$\alpha_P = 0.935(J_L/J_{LP})^{-1.29} - 0.927 \quad (13-2)$$

$$R^2 = 0.8412, \quad ID = 0.2723, \quad N = 1651$$

$$\alpha_P = 1.66(J_P/J_{LP})^{1.09} + 0.00909 \quad (13-3)$$

$$R^2 = 0.8406, \quad ID = 0.2731, \quad N = 1651$$

$$\alpha_P = 0.00465(\rho_P/\rho_L)^{1.43} + 0.0257 \quad (13-4)$$

$$R^2 = 0.01541, \quad ID = 0.5502, \quad N = 1651$$

$$\alpha_P = -6.54 \times 10^{-4} [J_{LP}/(gD)^{0.5}]^{2.48} + 0.0451 \quad (13-5)$$

$$R^2 = 0.01615, \quad ID = 0.5578, \quad N = 1651$$

$$\alpha_P = -2.98 \times 10^{-5} (\rho_L D J_{LP}/\mu_L)^{0.613} + 0.0550 \quad (13-6)$$

$$R^2 = 0.04792, \quad ID = 0.5456, \quad N = 1651$$

$$\alpha_P = 2.72 \times 10^{-6} C_{DF}^{-8.46} + 0.0406 \quad (13-7)$$

$$R^2 = 0.008893, \quad ID = 0.5514, \quad N = 1651$$

以上の結果を見ると、使用した実験データの範囲内において、無次元量によって、 R^2 と ID が大きく異なることが判る。

次に、項数を順次増やすことによる推算精度の変化状況を示す。項数を増やす際、項数が1の場合における R^2 の大きな項を順次加えた。

(2) 項数が2の場合

$$\alpha_P = 0.870(J_L/J_{LP})^{-2.15} (J_P/J_{LP})^{0.902} + 0.00628 \quad (14)$$

$$R^2 = 0.8414, \quad ID = 0.2716, \quad N = 1651$$

(3) 項数が3の場合

$$\alpha_P = 2.00(J_L/J_{LP})^{-2.80} (J_P/J_{LP})^{0.832} (\rho_L D J_{LP}/\mu_L)^{-0.111}$$

$$+ 0.00519 \quad (15)$$

$$R^2 = 0.8517, \quad ID = 0.2638, \quad N = 1651$$

(4) 項数が4の場合

$$\alpha_P = 17.6(d_P/D)^{0.189} (J_L/J_{LP})^{0.646} (J_P/J_{LP})^{1.01}$$

$$(\rho_L D J_{LP}/\mu_L)^{-0.223} + 0.00879 \quad (16)$$

$$R^2 = 0.8709, \quad ID = 0.2652, \quad N = 1651$$

(5) 項数が5の場合

$$\alpha_P = 0.339(d_P/D)^{0.327} (J_L/J_{LP})^{-0.734} (J_P/J_{LP})^{0.661}$$

$$[J_{LP}/(gD)^{0.5}]^{-0.585} (\rho_L D J_{LP}/\mu_L)^{0.134} - 0.00521 \quad (17)$$

$$R^2 = 0.9581, \quad ID = 0.1654, \quad N = 1651$$

(6) 項数が6の場合

$$\alpha_P = 0.280(d_P/D)^{0.299} (J_L/J_{LP})^{-1.29} (J_P/J_{LP})^{0.611}$$

$$(\rho_P/\rho_L)^{0.164} [J_{LP}/(gD)^{0.5}]^{-0.550} (\rho_L D J_{LP}/\mu_L)^{0.115}$$

$$- 0.00702 \quad (18)$$

$$R^2 = 0.9590, \quad ID = 0.1670, \quad N = 1651$$

(7) 項数が7の場合：前記の式(6)である。

式(13)-(18)による固相体積率の推算値と実験値の関係の代表例を、Figs. 5-7に示す。これらの式と図、式(6)並びにFig. 1より、項数が推算式の推算精度に及ぼす効果について述べる。

固相体積流束比 J_P/J_{LP} (Fig. 5)に注目すると、推算値に対する実験値のばらつきの幅は広いが、体積流束のみの簡易的近似式とみなせる。

液相体積流束比とレイノルズ数 Re を加味した項数が3の場合のFig. 6は、上記のFig. 5とほとんど同じに見える。ついで、固相粒子径と管径の比とフルード数 Fr を加味した項数が5の場合のFig. 7では、ばらつきの幅が少し狭くなっている。さらに、固液両相の密度比、抗力係数を加味した項数が7の場合(Fig. 1, 式(6))では、わずかながらばらつき幅がさらに狭くなっている。

二次元平面上のデータ点の散らばりを含む分布状態を、それらの重なりによって定性的には確定できない場合があるが、 R^2 と ID による定量的

Fig. 5 Calculated values by Eq.(13-3) expressed by 1 term vs. Experimental results of volumetric fraction of solid phase

Fig. 7 Calculated values by Eq.(17) expressed by 5 terms vs. Experimental results of volumetric fraction of solid phase

Fig. 6 Calculated values by Eq.(15) expressed by 3 terms vs. Experimental results of volumetric fraction of solid phase

判定を併用すると、入力物理量と項の数を増加させると推算式の推算能力が高くなると判定できる。

以上より以下のことが言える。極めて多種多様でしかも複雑な流れである混相流の流動特性を表現する式を導く場合に、使用流体、固体粒子、流路などの入力物理量の重要度を精密に評価し取捨選択するのは難しい。そのような場合、流動特性の表現に微力ながらも影響すると考えられる物理量も含めて、出来るだけ多くの入力物理量を使用すれば、それらの数は多くなるが、結果的に推算精度の高い、説明能力[7]の優れた高精度の推算式

を提示することが可能となる。なお、入力物理量と項の数の増加によって生じる計算上の煩雑さは、コンピュータと計算ソフトの利用で解決できる。

4.3 流動特性と無次元量の指数との関係

式(13)-(18), (6)に見られるように、推算式の項数の増加につれて、無次元量の指数の値が変化している。これは、追加された無次元量に含まれる入力物理量の効果を新たに考慮した、より高精度の推算式 (R^2 のより大きい推算式) を得るための調整により生じたものである。このように、各推算式に含まれている無次元量の種類と各指数の値は一体となっているので、その推算式から特定の無次元量を削除した推算式は、異なった値の R^2 と ID を持った別の推算式となる。

無次元量に含まれる入力物理量の効果を指数によって評価する場合、そこに使用されている無次元量の種類あるいは入力物理量の下での評価であることに留意する必要がある。例えば、指数の小さい無次元量あるいは入力物理量の流動特性に及ぼす効果は、その推算式に含まれている無次元量あるいは入力物理量の下で微小であることを表している。

4.4 推算式の適用範囲の拡大

混相流に対する他の研究者による従来の推算式では、その入力物理量の種類と形式は、流動特性量ごとに異なっていることが多い。これに対し、著者らは気液二相流に対し、入力物理量の種類と形式は同一で、そこに含まれる定数と指数の値の

みが異なる推算式を与えた[1-4]。今回、同様のことが固液二相流、固気液三相気泡流並びに固気液三相スラグ流においても成り立った。このように、著者らの提案する同一形式の推算式は、広範囲の混相流の流動特性量を表現することが可能であり、さらにその適用範囲の拡大が期待できる。

5. 今後の課題

混相流学会年会(2004)において湊 明彦氏から、 Fr に浮力効果を組み入れる必要が在るのではないかと指摘があった。これは、固気液三相流の推算式における浮力効果の表現方法を含めて、将来解明されなければならない課題である。

本研究の推算式に含まれている種々の定数と指数の決定には、実験データが用いられているので、古今の実験式的推算式の宿命的な不可避的限界として、その適用範囲はその導出に使用した実験データの範囲内に限られる。今後さらに、この基礎概念が種々の混相流のより多くの流動特性量に適用され、各入力物理量の変化幅が同等で、そこでの分布状態が粗密なく均一である実験データ群の利用によって高推算精度の推算式が提示されることを願っている。

6. 結 言

等温、定常、発達流れ状態の気液二相流の流動特性は、使用流体の物性値、流路条件と流動条件から成る一組の入力物理量群と一義的な因果関係にある。そして、その推算式は、入力物理量の種類と形式が同一で、そこに含まれる定数と指数の値のみが異なる式で表現できる。この基礎概念を、固液二相流並びに固気液三相気泡流、固気液三相スラグ流の各相体積率に対して適用し、べき乗積の同一形式で表した推算精度の高い推算式を得た。

謝 辞

本研究に使用した実験データの提供者である赤対秀明、南川久人、稲垣勝己、楊 克寧、池原匡禮の諸氏の理解と助言に感謝いたします。

参考文献

[1] 坂口忠司, 浜口八朗, 赤対秀明, 富山明男, 南川久人, 細川茂雄, 鉛直管内気液二相スラグ流における大気泡長さ、液体スラグ長さ、スラグユニット長さ並びにスラグ周期の推算式, 混相

流, 15-3, 288-295(2001).

- [2] 坂口忠司, 坪根弘明, 佐田富道雄, 南川久人, 赤対秀明, 鉛直円管内気液二相流における気相体積率の推算式, 混相流, 17-1, 54-61 (2003).
- [3] 坂口忠司, 管内気液二相流の流動特性に対する推算式の一基本形態, 混相流学会年会講演会論文集, 7-8 (2003).
- [4] 坂口忠司, 赤対秀明, 南川久人, 川原顕磨呂, 坪根弘明, 気液二相流の摩擦圧力降下の推算式, 機械学会第 81 期流体力学部門講演会講演論文集, 0S13, 1308(2003).
- [5] 坂口忠司, 吉永俊雄, 混相流の流動特性に対する共通形態の推算式(第1報, 共通形態の推算式とその体積率への適用), 混相流学会年会講演会論文集, 157-158(2004).
- [6] 吉永俊雄, 南川久人, 坂口忠司, 混相流の流動特性に対する共通形態の推算式(第2報, 共通形態の推算式による体積率の実験式的推算式の推算能力), 混相流学会年会講演会論文集, 159-160(2004).
- [7] 縄田和満, Excel による回帰分析入門, 朝倉書店(1989).
- [8] 赤対秀明, 垂直円管内固気液三相気泡流の流動特性に関する研究, 神戸大学博士論文(1995).
- [9] 南川久人, 垂直管内固気液三相スラグ流の流動特性に関する研究, 神戸大学博士論文(1997).
- [10] 吉永俊雄, エアリフトポンプによる粗粒子輸送に関する研究, 熊本大学博士論文(1989).
- [11] 稲垣勝己, 粗粒子群の垂直管内水力輸送に関する研究, 熊本大学修士論文(1990).
- [12] 楊 克寧, 垂直管内固液二相流, 熊本大学修士論文(1994).
- [13] 池原匡禮, 固液二相流の粒子群速度, 西日本工業大学卒業論文(1994).
- [14] Ansari, A., Sylvester, N., Sarica, C., Shoham, O. and Brill, J., A Comprehensive Mechanistic Model for Upward Two-Phase Flow in Wellbores, SPE Production & Facilities J., 143-152(1994).
- [15] García, F., García, R., Padrino, J.C., Mata, C., Trallero, J.L. and Joseph, D.D., Power Law and Composite Power Law Friction Factor Correlations for Laminar and Turbulent Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipelines, Int. J. Multiphase Flow, 29, 1605-1624(2003).