【整番】FE-03-IG-051	【標題】気液２相流における基本的なパラメータとそれらの相関	
分類：流れ(気液２相流)／種別：初心手引き	作成年月：H21.1／改訂：Ver0.5(21.6)	作成者：N.Miyamoto

項目追加など（N.M）　　全６ 枚

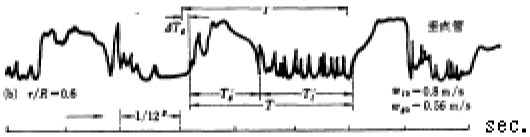
１．はじめに

通常の液やガスの単一の流れから気液２相流に踏み込んでみてまず気になるのは、流れの基本的なパラメータ(例えば流量)に違いがあることである。当初の違和感にも由るのだろうが、これらの差異については、文献/資料類でよく略称や別称の類いが用いられているため、余計に混乱してしまうようだ。

これらの混乱を最小にして**早く二相流に馴染んでしまうには**、正しいパラメータの意味を理解するほかない。そこで本 TS では、頻繁に使用されている基本的なパラメータを採りあげてその解説を試みた。なお、以下の内容は JSME「気液二相流技術ハンドブック」[(1)]の第２章から抜粋して適宜、補足を加えたものある。

二相流動の例（垂直加熱管のとき）

ボイド率変動の例



2. 基本パラメータの定義と相関

この TS では、二相流問題でよく用いられる次のパラメータを取り上げる。

ボイド率、質量流束、クオリティ、容積流束、各相速度、密度、運動量流束、スリップ比、ドリフト速度

(1) ボイド率（Void Fraction）：α

二相流の断面は、密な液体の中に疎な気体が混在して一種の空洞になっているが、その空洞の割合をボイド率(α)と云っている。定義としては次の通り、むろん無次元数である。

１次元流れでは、全流路断面積に気相が占める面積割合。
３次元流れでは、対象点を囲む微少体積に気相が占める体積割合。

一次元流れは管路流れ、３次元流れは容器内の流れをイメージしてよい。面積割合が個々の断面積、体積割合が個々の微少体積に定義されるならば、これらの流れには無数の局所ボイド率が存在する。また時間によってこの局所ボイド率は変化する。例えば、気体の塊が間欠的に流れるスラグ流では気体の塊が通過する時に最大のボイド率、気体の塊が途切れる時に最小のボイド率となって、その間を周期的に変動する。しかし設計的にはこの局所的で時間限定のボイド率を議論しても無意味なことが多く、実際はある流動様式(＝フローパターン)ごと、あるいはある区切られた空間ごとに議論することが多い。従って特に断りのある場合を除いて、通常のボイド率は、

流動様式/流動区間によってあるいは時間的に平均化されたもの

と考えてよい。少しクドくなってしまったが、要は、**通常のボイド率＝平均ボイド率**と考えてよい。

ボイド率は言い換えれば**気体の体積分率**(α_G)である。通常は気体の体積分率だけで議論すれば済むが、場合によって液の体積分率(α_L)の方を重視することがある。通常、液の体積分率(α_L)は**ホールドアップ**あるいは**液ホールドアップ**(Liquid hold-up)と呼ばれている。これらの相関は次のようである。

$$\boxed{\alpha = \alpha_G、\quad (1-\alpha) = \alpha_L、\quad \alpha_G + \alpha_L = 1} \quad \text{--------------------------------------(a)}$$

ボイド率(α)は、実験あるいは理論＋実験で得られるもので、結果として多くの式や図表が提案されている。これについては別途、**[FE-03-TM-061 または 062]**を参照ください。

[なお文献/テキストによっては、ボイド率αは、εやfなどで表示されることもある。]

(2) 質量流束(Mass flux)： G

質量速度とも呼ばれる。単相の流れでは余り使われないが、二相流では一次元流量(管路流れ)を規定するものとして頻繁に使用されている。定義としては次の通り。

$\boxed{\text{流れ方向の単位断面積当たりの混合物の質量流量} \rightarrow \mathrm{G}\ \ [\mathrm{kg/m^2s}]}$

即ち　$G = M/A$　ここで、M＝全質量流量(kg/s)、A＝管路断面積(m^2)

Gは全質量流量に対して定義される。各相の質量流量に対しては、

$\boxed{\text{流れ方向の単位断面積当たりのその相の質量流量} \rightarrow \text{気相の場合}\ G_G、\text{液相の場合}\ G_L}$

即ち $G_G = M_G/A$、$G_L = M_L/A$、なお M_G＝気相の質量流量（kg/s)、M_L=液相の質量流量（kg/s)

各相の質量流束は、二相流計算のための Virtual(仮想的)なパラメータといえる。

G_G、G_Lは、Gの場合と同じく管路断面積Aで除されていることに注意すべき。$G-G_G-G_L$間では、

$$\boxed{G = G_G + G_L} \quad \text{--(b)}$$

が成立する。次項のクオリティxの定義式を用いれば、各相の質量流束は次のように表わすことができる。

$$\boxed{G_G = xG、\quad G_L = (1-x)G} \quad \text{--(c)}$$

[なお、Gはmや$\dot{m}$で表記されていることが多い。]

(3) クオリティ： x

全質量流束Gに占める気相質量流束の割合で、次の式で与えられる。

$$\boxed{x = M_G/M = G_G/G = (G-G_L)/G} \quad \text{---(d)}$$

気液二相流が例えば水－水蒸気のように1成分からなる場合、クオリティは熱力学でいう**乾き度**と対応する。この乾き度は**熱平衡クオリティ**(x_e)とも呼ばれ、周知の通り次のように定義される。

$$\boxed{x_e = (v-v')/(v''-v') \quad \text{あるいは} \quad x_e = (i-i')/(i''-i') = (i-i')/r} \quad \text{---------- -------(e)}$$

ここで　v＝比容積(m^3/kg)、i＝比エンタルピ(kcal/kg)、r＝蒸発潜熱(kcal/kg)

上付き符号 ’ → “飽和液”、上付き符号 ” → “飽和蒸気”、符号なし→ “気液混合物”

例えば水 - 蒸気では、乾き度 即ち熱平衡クオリティ(x_e)は、気相質量流束の割合即ちクオリティ(x)にだいたい同じであるが、伝熱管の沸騰が始まる部分では明らかにズレがある[詳しくはテキスト(2)の14章など参照のこと]。クオリティが乾き度と相関していることは大変便利である。しかし多成分系の流体では、単一な乾き度が定義できずクオリティ(x)の設定が難しくなる。

(4) 容積流束(Volumetric flux)： j

容積速度とも呼ばれる。前述の気相又は液相の質量流束(G_G,G_L)を、気相又は液相の密度(ρ_G, ρ_L)で除したものを夫々、気相の容積流束(j_G)あるいは液相の容積流束(j_L)という。単位は流速と同じ[m/s]。

$$j_G = G_G / \rho_G = xG / \rho_G, \qquad j_L = G_L / \rho_L = (1-x)G / \rho_L \qquad \text{---(f)}$$

これらは気相質量あるいは液相質量が単独で断面積 A の管路を流れるときの流速を表わしている。この流速は実体のない Virtual(仮想的)な流速であるから**見掛け流速**と呼ばれており、流動様式の判定や圧損/ボイド率の計算などに用いられている。なお j_G、j_L は流速のイメージがないので、よく u_{go}、u_{lo} とかで表わされることが多い。見掛け流速を用いたレイノルズ数を見掛けレイノルズ数 R_{eg}、R_{el}(＊1)と云う。

$R_{eg} = xGD/\mu_G$、$R_{el} = (1-x)GD/\mu_L$ 　[D=内径(m)、μ_G, μ_L＝気体,液体の粘性係数(Pa･s)]

気液混合物の容積速度即ち**全容積流束**(j_T)は気相と液相の容積流束の和である。

$$j_T = j_G + j_L = G\{x/\rho_G + (1-x)/\rho_L\} \equiv G/\rho_H \qquad \text{---(g)}$$
$$\rho_H = \{x/\rho_G + (1-x)/\rho_L\}^{-1}$$

ρ_H は均質流密度と呼ばれる(後述の密度の項を参照)。

なお、気相の容積流束を全容積流束で除したものを**容積乾き度**(β)と云う。

$$\beta = j_G / j_T \qquad \text{---(h)}$$

ここで　$j_G = xG/\rho_G$、$j_T = G/\rho_H$、また　$\rho_H = \{x/\rho_G + (1-x)/\rho_L\}^{-1}$　であるから、

$$\beta = x(\rho_H/\rho_G) = x/\{x + (1-x)(\rho_G/\rho_L)\} \qquad \text{---(i)}$$

単純には β は流量比を表わしており、

$$\beta = Q_G/(Q_L+Q_G) = (G_G/\rho_G)/(G_G/\rho_G + G_L/\rho_L) = x/\{x + (1-x)(\rho_G/\rho_L)\}$$

ここで　Q＝流量(m^3/s)である。

(5) 各相の速度(Phase velocity)：u

各相の実体としての**速度(流速)**(u_G、u_L)は、次の通り(＊2)。

$$u_G = j_G/\alpha = (G/\rho_G)(x/\alpha), \qquad u_L = j_L/(1-\alpha) = (G/\rho_L)\{(1-x)/(1-\alpha)\} \qquad \text{---(j)}$$

通常、気相速度と液相速度は一致することはなく、気相速度＞液相速度になる。

u_G,u_L は見掛け速度(j_G,j_L)に対して **真の速度(流速)**とも云われる。関連して、[j_G,j_L,j_T,G_L,G_G,G]を速度[u_G,u_L]で表わすと、次のようになる。

$$j_G = \alpha u_G, \quad j_L = (1-\alpha)u_L, \quad j_T = \alpha u_G + (1-\alpha)u_L \qquad \text{---(k)}$$
$$G_G = \alpha\rho_G u_G, \quad G_L = (1-\alpha)\rho_L u_L, \quad G = \alpha\rho_G u_G + (1-\alpha)\rho_L u_L$$

(6) 密度(Density)： ρ

二相流の平均密度(ρ_{TP})は次式で定義され、管路の重力による静圧降下を計算するときなどに用いる。

$$\rho_{TP} = \alpha\rho_G + (1-\alpha)\rho_L \qquad \text{---(l)}$$

均質流モデルでは、ρ_{TP} は、次の均質流密度に等しい(＊3)。

$$\rho_H = \{x/\rho_G + (1-x)/\rho_L\}^{-1} \qquad \text{---(m)}$$

(7) 運動量流束(Momentum flux)：MF

運動量流束 MF は、単相流でいう ρV^2(密度 x 流速の自乗)であり、圧力の単位(Pa)を持ち、流体力の大きさを表現する。例えば、速度圧や衝突圧の形で、流れ構造を検討するときなどに用いられる。

通常の断熱二相流では通常、次の均質流モデルによる式が用いられる(＊4)。

$$MF = G^2\{x/\rho_G + (1-x)/\rho_L\} \quad \text{------(n)}$$

(8) スリップ比（Slip ratio）：S

スリップ比は気相速度と液相速度の比と定義される。

$$\boxed{S = u_G/u_L = (\rho_L/\rho_G)\{x/(1-x)\}\{(1-\alpha)/\alpha\}} \quad \text{------(o)}$$

注目すべきはスリップ比とボイド率の関係である。スリップ比を用いてボイド率を表わすと、

$$\boxed{\alpha = x/\{x + S(1-x)(\rho_G/\rho_L)\}} \quad \text{------(p)}$$

これは前述の(i)式 $\beta = x/\{x+(1-x)(\rho_G/\rho_L)\}$とよく似ている(この事実からαとβの関係を理論や実験で求めて、ボイド率の算定などに利用しょうという考えもある)。この場合、βは S=1 即ち気相速度と液相速度が等しいときのαに等しい。すなわち、<u>S=1 のとき　α＝β</u>となる。

[因みに S=1 即ち気相速度と液相速度が同じ流れを**均質流**という。均質流は余程、高圧にならない限り成立しないが、均質流を仮定したモデルは二相流を数理的に扱う上でよく用いられる。]

S=1 では $u_G = u_L$ であるから、全容量流束 j_T は、次のようになる。

$$j_T = j_G + j_L = \alpha u_G + (1-\alpha)u_L = u_L$$

この場合、管路の実流速を $u(=u_L=u_G)$とすれば、$j_T = u$ となり、**全容積流束と管路の実流速は同じ**になる。なお(4)項の式は $j_T = j_G + j_L = u = G/\rho_H$ となるが、これは(＊3)とは異なるアプローチで、S=1 即ち均質流モデルの密度が　$[\rho_H = \{x/\rho_G + (1-x)/\rho_L\}^{-1}]$ になることを示している。

(9) ドリフト速度（Drift velocity）:

二相流を理論的に扱う場合、<u>均質流モデル</u>、<u>二流体モデル</u>、<u>ドリフトフラックスモデル</u>という 3 つのモデルがある。ドリフト速度は主にドリフトフラックスモデルで用いられるものであり、むしろローカルな用語と云ってもいいが、よく議論で引用されるのでここで簡単に説明しておく。

1 次元流れ(管路流れ)の気相速度(u_G) はドリフト速度(u_{Gj})を用いて[$u_G = j_T + u_{Gj}$]で表わされる。これを前(5)項の流速の式などを用いて変形すると、

$$\boxed{u_{Gj} = u_G - j_T = (1-\alpha)(u_G - u_L)} \quad \text{------(q)}$$

この式からドリフト速度が、ある局所的な気液間の速度差を表わすものであることがわかる(もともとモデル論からでた Virtual なパラメータである)。このボイド率αはローカルなものであるから、それを平均化して、次のドリフトフラックスモデルの基本式が得られる[(3)]。<　>は平均化を意味する。

$$\boxed{\langle j_G\rangle / \langle\alpha\rangle = \{\langle\alpha j_T\rangle/(\langle\alpha\rangle\langle j_T\rangle)\}\langle j_T\rangle + \langle\alpha u_{Gj}\rangle/\langle\alpha\rangle} \quad \text{------(r)}$$

ここで、$\{\langle\alpha j_T\rangle/(\langle\alpha\rangle\langle j_T\rangle)\} = C_o$、$\langle\alpha u_{Gj}\rangle/\langle\alpha\rangle = \langle\langle u_{Gj}\rangle\rangle$　とし、$j_G/j_T = \beta$ の関係を用いて、

$$\boxed{\alpha = \beta / \{C_o + \langle\langle u_{Gj} \rangle\rangle / j_T\}} \quad \text{---} (s)$$

ここで $\langle\langle u_{Gj} \rangle\rangle$は**平均化されたドリフト速度**、$C_o$は**分布パラメータ**と呼ばれ、気液の速度分布やボイド率分布から得られるもの。平均ドリフト速度(u_{Gj})及び分布パラメータ(C_o)の多くは、既に実験や理論から得られている。

<u>**以上の(a)～(s)式は、公式として使用できる。**</u>

脚注（＊1）レイノルズ数 $R_e = uD/\nu$。ここで $\nu = \mu/\rho$ であるから　$R_e = \rho uD/\mu$。また $\rho u = G$ であるから、$R_e = GD/\mu$ となる。G, μ の代わりに $G_G[=xG], \mu_G$ 及び $G_L[=(1-x)G], \mu_L$ を用いて、

$$R_{eg} = G_G D/\mu_G = x\,GD/\mu_G、\quad R_{el} = G_L D/\mu_L = (1-x)GD/\mu_L$$

（＊2）$u_G = M_G/(\alpha A \rho_G) = (G_G/\rho_G)/\alpha = (xG/\rho_G)/\alpha = (G/\rho_G)(x/\alpha)$、

あるいは　$u_G = M_G/(\alpha A \rho_G) = (G_G/\rho_G)/\alpha = j_G/\alpha$

$u_L = M_L/(\alpha A \rho_L) = (G_L/\rho_L)/(1-\alpha) = \{(1-x)G/\rho_L\}/(1-\alpha) = \{G/\rho_G\}\{(1-x)/(1-\alpha)\}$

あるいは　$u_L = M_L/(\alpha A \rho_L) = (G_L/\rho_L)/(1-\alpha) = j_L/(1-\alpha)$

（＊3）ボイド率 $\alpha = x/\{x + S(1-x)(\rho_G/\rho_L)\}$は、均質流のとき $S=1$ ($u_G = u_L$)であるから、$\alpha = x/\{x + (1-x)(\rho_G/\rho_L)\}$になる。これを(l)式に代入し $\rho_{TP} = \rho_H$ とおくと(m)式が得られる。

（＊4）二相流を単一な混合物とみなすと、$MF = \rho u^2 = \rho(G/\rho)^2 = G^2/\rho$。均質流では $\rho = \rho_H$ であるから、(m)式の ρ_H を代入して(n)式が得られる。

3. 例　題

内径Φ50ｍｍのチューブを質量流量 800 kg/hr、クオリティ 0.2 の気液混合物が流れる。この場合のボイド率/質量流束/容積流束/容積乾き度/各密度/運動量流束/各相流速を計算せよ。なお密度は、$\rho_G = 8\ \mathrm{kg/m^3}$、$\rho_L = 400\ \mathrm{kg/m^3}$　とする。

答）まずスリップ比を Smith の式より求める。Smith 式については別途**[FE-03-TM-061]**を参照。

スリップ比：$S = 0.4 + 0.6(\rho_L/\rho_G)^{1/2}[\{x + 0.4(1-x)(\rho_G/\rho_L)\}/\{x + 0.4(1-x)\}]^{1/2}$

$= 0.4 + 0.6x(400/8)^{0.5}[\{0.2 + 0.4(1-0.2)(8/400)\}/\{0.2 + 0.4(1-0.2)\}]^{0.5}$

$= 0.4 + 4.24x(0.2064/0.52)^{0.5} = 3.07$

これを用いて、以下。

ボイド率：$\alpha = x/\{x + S(1-x)(\rho_G/\rho_L)\} = 0.2/\{0.2 + 3.07x(1-0.2)x(8/400)\} = 0.803$

ホールドアップ：$(1-\alpha) = 1 - 0.803 = 0.197$

質量流束：$G = M/A = 800/3600/(3.1413x0.05^2/4) = 113.2\ \mathrm{kg/m^2s}$

気相質量流束：$G_G = x\,G = 0.2x113.2 = 22.64\ \mathrm{kg/m^2s}$、

液相質量流束：$G_L = (1-x)G = 0.8x113.2 = 90.56\ \mathrm{kg/m^2s}$

気相容積流束：$j_G = G_G/\rho_G = 22.64/8 = 2.83\mathrm{m/s}$

液相容積流束：$j_L = G_L/\rho_L = 90.56/400 = 0.226$ m/s

全容積流束：$j_T = j_G + j_L = 2.83 + 0.226 = 3.056$ m/s

容積乾き度：$\beta = j_G / j_T = 2.83/3.056 = 0.926$、

二相流密度：$\rho_{TP} = \alpha \rho_G + (1-\alpha)\rho_L = 0.803x8 + (1-0.803)x400 = 85.22$ kg/m^3

均質流密度：$\rho_H = \{x/\rho_G + (1-x)/\rho_L\}^{-1} = (0.2/8 + 0.8/400)^{-1} = 37$ kg/m^3

運動量流束：$MF = G^2\{x/\rho_G + (1-x)/\rho_L\} = 113.2^2x(0.2/8 + 0.8/400) = 346$ Pa

気相速度：$u_G = j_G/\alpha = 2.83/0.803 = 3.524$ m/s、

液相速度：$u_L = j_L/(1-\alpha) = 0.226/(1-0.803) = 1.147$ m/s

スリップ比：S＝3.524/1.147＝3.07　　OK

引用文献・テキスト）

(1) 日本機械学会編「気液二相流技術ハンドブック」(コロナ社)

(2) 植田「気液二相流－流れと熱伝達」(養賢堂)

(3) 日本原子力学会・熱流動部会編「気液二相流の数値解析」(朝倉書店)