■ 混 相 流

i) 気 液 混 相 流*

飯 田 嘉 宏**

気液混相流の研究は最近非常に多くなっているが、研究初期のころにくらべて飛躍的な進展が余りないように思える。これは混相流の構造が非常に複雑なためと、この構造を解明する適当な測定法が少なかったためではなからうか。しかし最近混相流の各種パラメータの局所値を測定するいろいろな方法が開発され、各所で使用されてきており、流路断面内の分布に始まって微視的構造が次第に明らかになりつつある。単相流におけると同様にこれらの解明が理論的展開にも大きな飛躍を生むことも遠いことではないであろう。

そこで本稿では、最近の測定技術のうち、特に局所値測定法に力点を置いて記述してみた。また混相流の構造を決定する最も基本的な量は、ボイド率、気液の各速度なので、この3者に焦点を絞る。なお各種の測定法に関してのレビュー集⁵⁾や資料²⁾があることを付記しておく。

1. ボイド率 (ガスホールドアップ)

1.1 空間内ボイド率

ボイド率 ϵ_g は気液混合物の容積 ΔV 内の気体容積率として定義されており、一般に ΔV は気泡や液滴の大きさにくらべて十分に大きくとって考えられている。たとえばある管路長にわたるような3次元空間の値が最も一般的であり、この測定法としては、二つの弁を同時に急閉して分離した両容積を測る方法、混相流の重量を測る方法²⁹⁾、流れ方向2点間の電気伝導度から求める方法^{27,35)}などがある。また気泡塔のように摩擦や加速の項が無視できるような流動条件では、垂直方向2位置間の圧力差から容易に求められる。

流れ方向に ϵ_g の分布がないとすれば、容積割合は断

面積割合と等しい。實際上多少の厚みをもつが、断面積内のような2次元空間内の測定法としては、静電容量法^{26,34)}、内部放射線源法²⁸⁾、電磁流量計法¹¹⁾などがある。また断面内に分布がないとすれば、断面内の一弦の長さ割合(1次元)として ϵ_g が考えられ、この場合には放射線ビーム透過法⁸⁾が該当する。

1.2 局所ボイド率

ボイド率の局所値として、ある位置での断面積割合を呼ぶこともあるが、これは流れ方向の分布に主眼を置く場合である。本来の意味からすれば、ある一点または微小容積 ΔV^* 内の値を局所値と呼ぶべきであろう。しかし混相流は非均質なものだから、 ΔV^* を無限に小さくすると ϵ_g は1または0の値のみを時間的に断続してとることになる。これは混相流の基本的性格のひとつであるが、1の値をとる時間の和、言い換えると局所が気体に占有される時間の和の全測定時間に対する割合(気体時間率)は、局所ボイド率と呼んで良いことが現象論的に証明^{13,14)}できる。すなわち局所の気体時間率を3次元空間にわたって積分して得た平均値は、その空間のボイド率に等しくなる。これは気液間のスリップの有無、界面速度の分布の有無、流動様式の相違などに関係しないが、統計論的な考え方をしているので、測定時間はある程度以上大きくとる必要があり、時間平均値を得ることにな

図 1 電気抵抗探針式ボイド計の構成と探針の例

* 昭和48年2月6日受理

** Yoshihiro Iida (正会員) 横浜国立大学工学部

図2 電気抵抗探針法による検出信号（蒸気泡の検出，探針径 0.04 mm，交流）

図3 円管内上向き空気-水混相流（気泡流）の半径方向ボイド率分布実測例

る。またこのことは気液以外の混相流についても成立する¹⁷⁾。

したがって局所ボイド率測定は、気体時間率を求めることに帰着するから、両相を判別し時間的変化を記録できるものであればなんでもよいことになる。

1.3 電気抵抗探針法

最も簡便で広く使用されているのは、液体の導電率が気体よりも高いことを利用した本法である⁶⁾。一例¹⁴⁾を図1(a)に示したが、検出部は微小電極1(局所に相当し、先端の電極以外は絶縁されている)であり、対応して大電極2が設けられている。そしていずれの相が1を占有しているかによってのみ両電極間の電気抵抗がほぼ定まるようになっている。電源に直流を使うと矩形波に近い信号が得られるが、時間率を測定するためには交流を使用し、気体検出信号のみの発振数を波高選別器で区別して計数器で計数し、測定時間内の全発振数との比をとれば、これは気体時間率に等しくなるので、ずっと容易に求まって便利である。また電極の電気分解の恐れもなく、しかし液の比抵抗が大きいと浮遊容量Cによって

判別が困難になることがあるが、インダクタンス L を挿入して直列共振回路を形成し、共振周波数で使うとこの点を解決できる。図1(b)は沸騰蒸気泡の挙動を研究^{15,19)}するために用いた探針の例である。図2には検出信号の例を掲げた。また図3は同法で上向き円管内空気・水混相流の半径方向ボイド率分布を測定した結果の例²⁰⁾である。

本測定法の精度は、微小電極と探針の大きさおよび流動状況に関係する。電極が小さいほどシャープな検出信号が得られる。また探針の存在が流れに影響を与えないように、できるだけ細いことが望ましい。著者ら²⁰⁾は相当直径4mm程度の気泡から成る空気・水混相流について、直径0.1mmの絶縁線を鋭利な刃物で直角に切断して電極とした探針を使用したが、誤差は約2%以内であった。

このような電気抵抗探針は最近非常に多く使われてきており、断熱混相流中^{6,20,21)}だけでなく、気泡塔内^{4,25)}、プール沸騰伝熱面上^{10,19)}、強制対流沸騰中¹⁶⁾のボイド率分布また液膜厚さ、蒸気膜厚さなどが測定され、またLarrouxら²²⁾は流動層についても使用し、半径方向に約30%のボイド率の相違があることを示している。さらに流動様式の判別^{6,18)}や、気泡群の統計的性質の研究²¹⁾に利用しようとする試みがある。

1.4 他の局所ボイド率測定法

以上に対し、両電極共振針にしたDouble Probe法²⁾がある。これは両電極間距離が検出部となる。また後述のAnemometer法、Sampling法その他、ファイバースコープによって光学的に気液の存否を検出しようとするもの^{12,23)}などがある。これらは液相連続の混相流のみに使用できるSingle Probe法にくらべて、液不連続の場合にも使用できる利点をもっているが、現在のところ装置、手順が複雑であったり、検出部を余り小さくできないという点で測定精度に検討の余地がある。

2. 局所液速度、気速度の測定

2.1 Anemometer法による局所液速度の測定

混相流における局所速度は少々複雑である。両相の速度の間に相違すなわちスリップがあることや、気泡、液滴ごとの速度の相違などがあるためである。局所速度にもボイド率と同様に時間的変動を考える最も微視的な取り扱いと、時間的平均値を考える場合がある。

図4は円錐状探針先端に、リング状の白金膜Anemometerをつけて主に液速度変動を測定した²⁾ものである。液と探針とのぬれのために、気液界面性状と検出信号との関係は図のようになる。時間1以前では液の平均速度が測られている。界面通過の前後に高い液速度を示すのは興味深いがつぎのことを示している。すなわち一

般に気速度は平均液速度より大きい、この場合のように気体が不連続相のときは気速度は界面速度に等しい。ところが界面に接している液体の速度は当然界面速度に等しく、界面から離れるにしたがって平均速度まで遅くなるのである。このような液速度の上昇は検出部の近くを他の気泡が通過した時にも示されるが、この他に混相流特有の脈動や乱流的挙動が加わるためさらに複雑になる。

このような微視的な構造を測定するには、Anemometer法が最も有効な武器であるが、検出部の挿入によって流れ自体に影響を与えたり、図4に示したように液体とのぬれの問題が、信号を解析するに当たって重要な問題になってくるため、気泡径や速度の大きさによって使用の範囲が限られる。

2.2 Isokinetic Sampling 法

時間平均局所気・液速度、ボイド率、エントレイメントなどを得るため、いわゆる Sampling 法が各所で用いられてきている^{7,24,30,33)}。これは混相流中に小管を挿入し、そこから混相混合物を外部に取り出して上記のものを得ようとするのである。

このうちサンプル管入口の静圧を、それを設けた流路断面の静圧と等しくして吸入する Isokinetic Probe は、入口に比して不連続相の大きさが小さければ(噴霧流)、原理的に混相流の流れ自体にほとんど変化を与えず真の値が得られるので、とくにここで紹介する。図5はその構成の一例³²⁾である。1は Probe で断面内静圧タップ2とサンプル管内静圧タップ3との圧力が等しくなるようにマノメータ4で読みながらバルブ5を調節してサンプリングする。この場合は isokinetic 条件を満たしているわけで、6で測られる単位時間内のサンプリング量を入口面積で除して求まる各質量速度 G_g , G_l と(1)式から両相の速度 u_g , u_l が得られる。

$$G_g = \varepsilon_g \rho_g u_g, \quad G_l = (1 - \varepsilon_g) \rho_l u_l \quad (1)$$

また気泡や液滴が非常に小さい混相流では、 $s = u_g/u_l = 1$ と考えられるので、(1)式から直ちに速度およびボイド率が求まる。また $s \neq 1$ だが一定の場合については、バルブ5を閉めて1を Impact Tube とし、動圧 Δp をマノメータ4で測定する。Adorni ら¹⁾は両相の異なる挙動を考慮し、いくつかの仮定をおいて入口に対応した運動量平衡から(2)式を導いている。

$$\Delta p = \frac{1}{2} \varepsilon_g^2 \rho_g u_g^2 + \frac{1 + \varepsilon_g}{2} (1 - \varepsilon_g) \rho_l u_l^2 \quad (2)$$

したがって(1),(2)式より u_g , u_l , ε_g が求まる。(2)式の導出に当たっては、仮定のいかんによって結果が異なるが大きな差異はない。

サンプル管入口に対して液滴や気泡の大きさが大きいような場合(噴霧流を除くほとんどすべての流れ)には、isokinetic 条件であっても、気液の入口速度は真の

図4 Anemometer法によるボイド検出と液速度測定

図5 Isokinetic Sampling法の構成

(a) Adorni, et al.¹⁾ (b) Shires, et al.³²⁾
図6 Isokinetic Sampling Probeの2例

速度と等しくならず、また一般には $u_g/u_l > 1$ であるから余分の気体は除外される。しかし入口速度は両相につき一様となり、 $\rho_g \gg \rho_l$ では u_l にほぼ等しくなることが導かれる。このため各相のサンプル量の比は各相の接触時間割合に等しくなり、気体の全サンプル容積に対する割合はボイド率を与えることになる。

図6(a)はAdorni ら⁶⁾が噴霧流に用いたサンプル管の先端部である。この場合は sharp edge のものが推薦されているが、液滴径とサンプル管内の flooding が径の最小限界を与える。図6(b)はShires ら³²⁾が $0.1 < \varepsilon_g < 0.8$ の混相流に用いたもので、この場合にはオリフィスを小さくし、管を大きくした方が sharp edge のも

図7 Isokinetic Sampling 法による実測例

のよりよい結果を与えると報告している。

図7はSchraub³⁰⁾が空気・水上昇流の環状流半径方向について、isokineticに G_g , G_t , Δp を測定(a)し、関係式から ϵ_g , s およびクオリティ X を求めた(b)例である。

以上、局所値測定法を中心として、最近の気液混相流の測定技術を紹介した。測定精度の点などに問題が残るものがあるが、その点は今後の改良が待たれる。こうした測定技術によって、気液混相流研究に大きな進歩が生じることを期待するしだいである。

引用文献

- Adorni, N., et al.: CISE R-35 (1961)
- 赤川浩爾: 日本機械学会誌, **66**, 1424 (1963)
- 赤川浩爾: 機械学会論文集, **29**, 924 (1963)
- 明島高司ら: 化学工学協会北海道大会, **B 8** (1968)

- ASME: Two-Phase Flow Instrumentation (1969)
- Bergles, A.E.: *ibid.*, **70** (1969)
- Brown, F.C., W.L. Kranich: *A. I. Ch. E. Journal*, **14**, 750 (1968)
- Cook, W.H.: ANL-5621 (1956)
- Delhaye, J.M.: Two-Phase Flow Instrumentation (1969)
- 長谷川修ら: 機械学会論文集, **38**, 2927 (1972)
- Heineman, J.B., et al.: *Rev. Sci. Instr.*, **34**, 399 (1963)
- 日向滋: 機械学会論文集, **38**, 351 (1972)
- 飯田嘉宏: 原子力学会誌, **14**, 337 (1972)
- 飯田嘉宏ら: 同上, **9**, 2 (1967)
- 飯田嘉宏, 小林清志: 機械学会論文集, **34**, 1247 (1963)
- 飯田嘉宏: 第7回日本伝熱シンポジウム II-9・2 (1970)
- 飯田嘉宏, 若尾法昭: 化学工学協会東北大会 B-1 (1972)
- 飯田嘉宏ら: 第5回秋季大会, E 302 (1971)
- Jida, Y., K. Kobayashi: 4th Int. Heat Transfer Conf. B 1-3, (1970)
- 小林清志ら: 機械学会論文集, **35**, 2365 (1969)
- 小出耕造, 久保田宏: 化学工学, **30**, 801 (1966)
- Larroux, G.J., et al.: *Chem. Eng. Sci.*, **27**, 447 (1972)
- Miller, N., R.E. Mitchie: Two-Phase Flow Instrumentation, **82** (1969)
- 宮内照勝, 徐嘉男: 化学工学, **34**, 948 (1970)
- 諸岡成治, 加藤康夫: 第6回秋季大会, C 303 (1972)
- Novokhatskii, E.M.: *Measurement Tech.*, **6**, 486 (1960)
- 乙竹直ら: 第9回総合シンポジウム前刷集, (1970)
- Poletavkin, P.G., N.A. Shapkin: *Teploenergetika*, **5**, 54 (1958)
- 佐藤雄一ら: 第9回総合シンポジウム前刷集 (1970)
- Schraub, F.A.: Two-Phase Flow Instrumentation, **47** (1969)
- 世古口言彦ら: 第9回日本伝熱シンポジウム, C 302 (1972)
- Shires, G.L. and P.J. Riley: AEEW-M 650 (1966)
- Silvestri, M.: *Advances in Heat Transfer*, **1**, 355 (1964)
- 寺野寿郎ら: 機械学会論文集, **28**, 1597 (1962)
- 安川三郎, 安田守宏: 化学工学, **35**, 749 (1971)

ii) 固 気 2 相 流*

井伊谷 鋼一**・増田 弘 昭**

固気2相流のうち特に管内2相流に限って2,3の測定・実験技術を紹介する。紙数の関係もあって、2相流中の局所的な空気流量を測定するピトー管¹⁾についての研究や、局所的な粉体濃度を測定するサンプリング法¹⁾については述べることができなかった。また粒子速度の

新しい測定技術²⁾や、流体速度に関して研究されているレーザーによる流速測定法³⁻⁵⁾の粒子速度測定に対する可能性も検討していない。以下に述べる測定・実験技術が多少でも参考になれば幸いである。

* 昭和48年2月1日受理

** Koichi Iinoya (正会員) and Hiroaki Masuda (正会員)
京都大学工学部化学工学科