

## 気液二相流の流動状態について

神戸大学工学部機械工学科 坂口 忠 司

### 1) 気液二相流は、いろんなところで見られる。

気相と液相が共存して流動している流れを一般に気液二相流と呼んでいる。このとき一方の相が静止している状態、たとえば静止液体とその中を上昇する気ほうから成る系や逆に静止気体とその中を落下する液滴からなる系も気液二相流と見なされている。

このような気液二相流が、どこに存在するか探してみよう。まず天然自然に目を向けると、春の暖い朝に現われる春霞、家中をじっとりさせる梅雨どきの雨、台風の襲来により激しく岸壁に打ち寄せる波と乱れとぶ波しぶき、葛飾北斎描くところの富嶽三十六景に見られるあの美しい波、さらに discover Japan を成功させている各地の美しい滝など自然界には多くの気液二相流の例が見られる。

一方、工学上の各種装置内では、作為的にあるいは、不可避的に気液二相流が現われている。すなわち、火力発電所のボイラ蒸発管あるいは原子力発電所の原子炉冷却系統などの加熱により液相を気相に変化させている蒸発装置、タービン排気を液化する凝縮器などの冷却により気相を液相に変化させている凝縮装置、また高温高圧の液体を急激な圧力低下により気化させているフラッシング装置、さらに気ほうポンプの上昇管や油井および油送管などのように気体と液体を同時に輸送している流体輸送装置、キャピテーションを起しているポンプ、湿り蒸気の流れている低圧タービン、化学工学、空気調和、冷凍工業の各種装置などに気液二相流が見られる。また気液二相流を研究しはじめたころの学生は、よくビールで気液二相流の実験を試してみたいといっている。

このように自然界はもとより、各種工業上の

装置に気液二相流が存在しているのである。このように、いたるところで見られる気液二相流のうち、ここでは主として管内気液二相流について概説する。二相流が単相流にくらべてどの程度複雑なのかを簡単に考察しておく。二相流は各種物性値のことなる2種類の流体より成り立っているため、たとえば静止水中の気ほうは浮力のために停滞することなく上昇するし、また水平管内では密度の大きい流体が底部にそして軽い流体が上部に片寄って流れようとするなどの相互干渉もあって、外部条件により幾種類もの複雑な流動状態を示す。流れに影響すると思われる項目を表1に示し、このうち主要なものについて説明する。

表1 流動状態に影響する諸因子

流体の構成	一成分, 二成分
流路断面形状	円形, 非円形 (矩形, 環形など)
流路軸形状	真直, 屈曲, らせん
流路設置状況	水平, 傾斜, 垂直
管径	大口径, 中口径, 小口径, 細管
流動方向	上昇, 下降, 水平
各相の流動方向の関係	並行, 対向
熱的条件	断熱, 受熱沸騰, 放熱凝縮
時間的条件	定常, 非定常
流速	高速, 中速, 低速
圧力	高圧, 中圧, 低圧

まず気液二相流には、ボイラ蒸発管内の飽和水と飽和蒸気のような同一成分の液相と気相より成る一成分二相流もあれば、また水と空気の二成分より成る二相流もある。一成分二相流では、圧力の上昇あるいは降下により容易に気相より液相へあるいは液相より気相へと相変化する。また加熱されて液相から気相へあるいは逆

に冷却されて気相から液相へと相変化しながら流動している二相流もあれば断熱状態で相変化することなく流れている二相流もある。さらに流体が上昇するか下降するかその流動方向によっても、また両流体が同一方向に流れるか対向して流れるかにより流動状態はことなっている。管路形状および設置状況も流れに大きな影響を与える。たとえば直管と曲管では、遠心力の作用により、また水平管と垂直管では重力の作用により必ずしも同じような流動状態を示さないようである。したがって二相流を厳密に表わすには、たとえば垂直円管内並行上昇蒸気-水二相定常流のように表わさなければならない。もちろん、現実にこんな長ったらしい呼び名は用いられていない。

## 2) 気液二相流はなぜ研究されるのか。

なぜ気液二相流が研究されているのか、あまりむつかしいことはわからないが、結局他のものも問題が研究されているのと同じ理由によるものと思う。

水と空気に囲まれている我々の世界では、自然はもとより各種装置内に单相流だけでなく二相流がきわめて多く存在している。したがって装置内に二相流が不可避的に存在するときに、それによる障害を最小限にとどめようとする場合をはじめとして装置の使用条件がたとえば高温高圧あるいは高熱負荷に向ってきびしくなるときに、それに適応できる装置に改良しようとする場合やあるいは新装置の作成にさいして二相流を利用することの有効性を検討する場合などには、どうしても二相流の一般的性質はもとより流動の微視的な機構についても知っておくのが便利である。また二相流を見ていると、その美しさと複雑さに心引かれてついその性質を明らかにしたくなるのも重要な原因の一つと思う。

## 3) 気液二相流について、どういうことが研究されているか。

いずれの現象も大別すると巨視的事項と微視的事項に分けられる。気液二相流もその例外ではない。ただし、ここでは巨視的事項についてのみ触れる。

たとえば貫流ボイラ蒸発管系において、管入口に流入した液体单相流は加熱され沸騰蒸発現象により蒸気-水二相流となり蒸気量の増加に応じた各種の流れの有様——流動様式——を示しながらついに気体单相流となって管外へ出て行く。このとき蒸発部の管内壁面上では蒸気の発生、離脱が繰返されている。もし壁面に蒸気が停滞すると、その蒸気は外部から加えられた熱を内部液体へ伝えるのを妨げるので、管の温度は上昇し、管が焼損することがある。したがって管内流体を適切な速度で流動させなければならぬ。この適切な速度を求め、そのときの流動抵抗——圧力損失——を算定しポンプの吐出圧力を決定しなければ安全なボイラを設計することはできない。

この二相流の圧力損失は、いかなる方法で算出したらよいだろうか。圧力降下  $\Delta p_T$  は摩擦圧力降下  $\Delta p_f$ 、加速圧力降下  $\Delta p_a$ 、位置圧力降下  $\Delta p_h$  の和で、单相流の場合にならって

$$\frac{d\Delta p_t}{dL} = \lambda \frac{1}{D} \frac{1}{2g} \left( \frac{G}{F} \right)^2 v + \frac{G}{gF} \frac{d(Gv/F)}{dL} + \frac{\sin \beta}{v} \quad (1)$$

で表わされるとする。ここで右辺第1項が  $\Delta p_f$ 、第2項が  $\Delta p_a$ 、第3項が  $\Delta p_h$  である。また  $D$  : 管内径、 $F$  : 管内断面積、 $G$  : 流量、 $g$  : 重力加速度、 $L$  : 距離、 $v$  : 比体積、 $\beta$  : 管の水平面との傾斜角、 $\lambda$  : 摩擦係数である。式(1)を解くにさいして、摩擦係数の値として二相流の各種流動様式に対して従来からよく知られている单相流の摩擦係数をそのまま用いてよいのか、あるいは各種流動様式に応じて摩擦係数は変るのか、二相流の速度、比体積、粘性係数、レイノルズ数として何をいれればよいのかが問題になってくる。

これらのことを知るには、管内の気相と液相の流動状況を明確に知っておかなければならない。すなわち気相と液相はその混合割合に関係なくよく混合して両相が同一速度で流動している均質流体となっているのだろうか。もしそうなら二相流の比体積は、いわゆる乾き度  $x$  を用いて

$$v = (1-x)vl + xvg \quad (2)$$

で表わされるだろう。それとも各相は一樣に混合せずに別々に分かれ、そして気相が液相より速く流れているのではないだろうか。もし気液両相間に相対速度があって、気相が液相より速く流れているなら、管内全容積に占める気体の容積割合——ボイド率——は均質流体として求めたときの値より小さくなるだろう。その場合には二相流の比重量をこのボイド率  $fg$  を用いて

$$r = (1-fg)r_l + fg r_g \quad (3)$$

と表わす方が良いのではないかと気付くだろう。ここで添字  $g$ : 気体,  $l$ : 液体である。

このようにボイド率は、圧力損失を求めるさいに不可欠の重要な因子である。さらにまた摩擦損失を速度分布およびボイド率分布より理論的に算出する試みもあり、この場合には、流動様式に応じてボイド率分布、速度分布形状がことなるので、流動モデルを適確に定めて解析しなければならない。したがって流動様式も圧力損失を求めるさいに重要な因子となる。

これら流動様式、圧力損失、ボイド率は、相互に関連し合う主要因子であり、従来から多くの研究者により、実験的にまた理論的に研究されている。以下の章では、これら三主要因子のうちでも、とくに気相二相流を知るのに不可欠と見なされている流動様式についてのべる。

#### 4) 気液二相流には、どのような流れ——流動様式——があるか。

気液二相流の流動様式は、断熱状態であるか、あるいは加熱または冷却されているかによりことなっている。しかし、いずれにも共通した流動様式も多いので、まずよく研究されている熱の出入りのない断熱流の場合を例に説明する。

液体あるいは気体だけが流動している单相流の場合には、流動状態は層流と乱流に大別されている。これに対して気体と液体が同時に管内を流れている場合には、前述のように各流体の物性値、流速、管路の幾何学的形状によりきわめて多くの流動状態が存在する。この流動状態を直接目視観察するかあるいは高速度写真撮影

により静止させ、流動状態を幾何学的観点よりその特徴をとらえて分類した場合に、その各流動状態を流動様式 (Flow pattern) と呼んでいる<sup>1)</sup>。

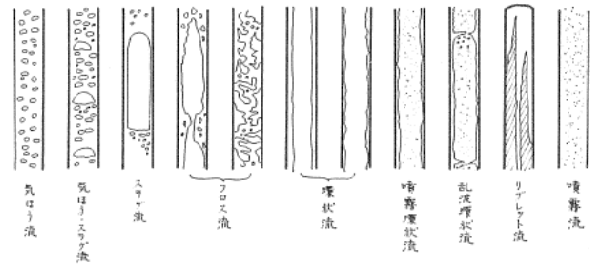


図1 垂直管内気液二相流の流動様式

図1および図2に垂直円管および水平円管における空気—水二相流の流動様式のスケッチが示されている。

まず垂直上昇流について説明する。液体流量にくらべて空気流量の少ない場合には、気体は液体中を小気ほうになって分散して流れている。このような流れを気ほう流 (Bubble flow) と呼んでいる。気ほう径が大きくなると、気ほうは管軸に平行な一直線上を一樣な速度で運動するのはまれで、ほとんどが回旋しながらあるいはゆらぎながら上昇している。気ほうの上昇速度は気ほうの大きさによりことなるので、相互に衝突して合体し大きな気ほうになることもある。したがって気ほう流では、等しい大きさの気ほうが管内に一樣に分布し等しい速度で整然と流動しているのではなく、気ほう径はもちろん気ほうの管内半径方向の密度分布、ひん度も一樣ではないのである。

気ほう流より空気流量の多い場合には、小気ほうは合体して長径が管径に近い傘状の気ほうになり、小気ほうと傘状大気ほうの混合した流れになる。さらに空気流量が多くなると、この傘状気ほうの長径はついに管径より大きくなるので、管内では気ほうは軸方向に伸ばされ砲丸状になり気ほうの周囲を液体が取り囲むようになる。この砲丸状大気ほうの後端部は、はげしく乱れ、後流部では小気ほうが渦巻いている。この流れをスラグ流 (Slug flow) と呼んでいる。気体部は、気体スラグ、液体部は、液体ス

ラグと呼ばれ、これらが交互に断続的に流れている。そのため静圧がきわめて激しく脈動する特徴を示している。また気体スラグの形状、その長さ、上昇速度、液体スラグの長さ、気体スラグの後流部の長さなどが研究されている。さらに気体流量が増加すると、砲丸状大気ほうは、さらに長くなり、ついに前後の気体スラグが合体するようになり一方気液界面は激しく乱れ気体と液体が混合し合うようになる。この流れをフロス流 (Froth flow) と呼んでいる。この流れはスラグ流から環状流への遷移域にある流動様式できわめて乱れのはげしい流れである。

液体流量が少なく空気流量が多いと、フロス流における気液界面のおだやかな流れとなる。すなわち壁面上を液体が膜状になって流動し、そして管中心部を気体が流動する流れになる。これを環状流 (Annular flow) と呼んでいる。この環状流において、気体流量を増加していくと、壁面上の液膜は、波立ちはじめ、そしてひきちぎられて気体部に液滴となって飛散していく。この飛散する液滴をエントレインメント

(entrainment) と呼んでいる。この流動様式は噴霧を伴う環状流なので噴霧環状流と呼んでいる。噴霧環状流において管中心部まで達するような波高の高い波が周期的に流動することがある。この波を disturbance wave と呼んでいる。さらに空気流量が増加すると、壁面上の液膜は管内面を一様に覆うことができなくなり、局所的に集まり、一部の壁面上には液体が存在しなくなる。このような小川のような流れをリブレット流 (Rivulet flow) と呼んでいる。さらに空気流量が多くなると、この小川も吹きとばされて、すべての液体は液滴となって管内を流れ、管壁には液膜がほとんど認められなくなる。この流れを噴霧流 (Spray flow) と呼んでいる。この環状流、噴霧流では、液膜厚さ、波高、波長、周期、液膜流量、液滴流量、液滴の半径方向分布、液膜内および気体部の速度分布、液滴発生限界などきわめて多くの事項が研究されている。しかし、リブレット流に関してはほとんど研究されていない。

これらの流動様式に、重力はきわめて大きな影響を及ぼす。水平管においても、気ほう流、環状流は見られるが、気体が管上部に片寄り下部の液部の厚さが大きくなる傾向がある。その顕著な例が層状流あるいは波状流である。すなわち気体が管上部を連続して流れ、下部を液体が流れ、気液の流量割合によって生ずる界面の波の有無により波状流 (Wave flow) あるいは層伏流 (Stratified flow) に区別されている。なお環状流においても気液界面に波が存在するが、波状流の波は水深にくらべて波高の小さい表面波である。スラグ流の流動している垂直管を図3のように傾斜させついに水平にすると<sup>2)</sup>、その流れはプラグ流に、またフロス流はスラグ流になる。垂直管と水平管ということで名称が

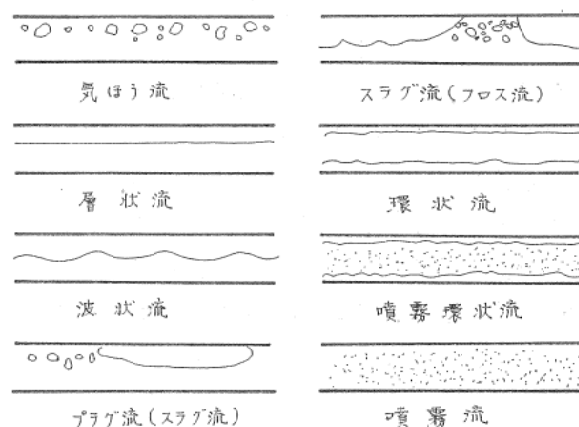


図2 水平管内気液二相流の流動様式

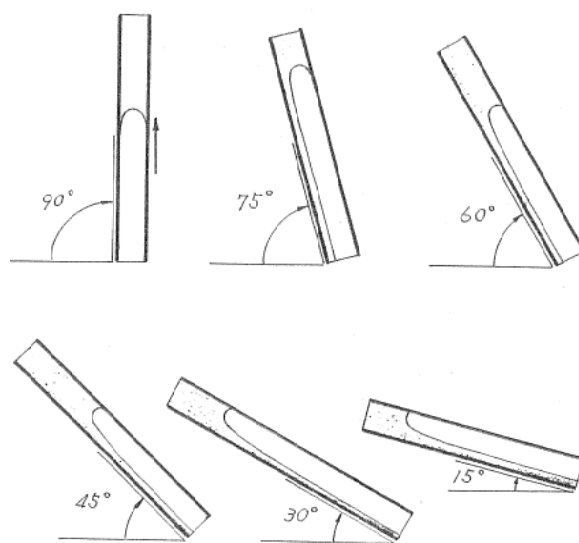


図3 気体スラグにおよぼす重力の影響<sup>2)</sup>

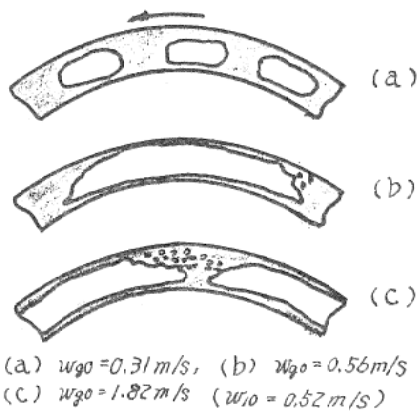


図4 気体スラグにおよぼす遠心力の影響<sup>4)</sup>

ことになっているのは、両者の相互関係のよくわからなかった時点で、おのおの別々に命名されたためである<sup>3)</sup>。( )内のように関連する流動様式に同一名称を与えようとする提案<sup>1)</sup>もある。

遠心力も流動様式に影響を与える。上向きらせん管内のスラグ流において気体スラグは、図4に示されているように、内側に片寄り 気体スラグの前後端の形状は歪んでいる<sup>4)</sup>。また環状流においては、液膜厚さは気液流速の違い場合に外側で厚く、速い場合に内側で厚くなりある流速で液膜厚さが逆転すること (film inversion) が知られている<sup>5)</sup>。

また管径が細くなって表面張力、界面張力が

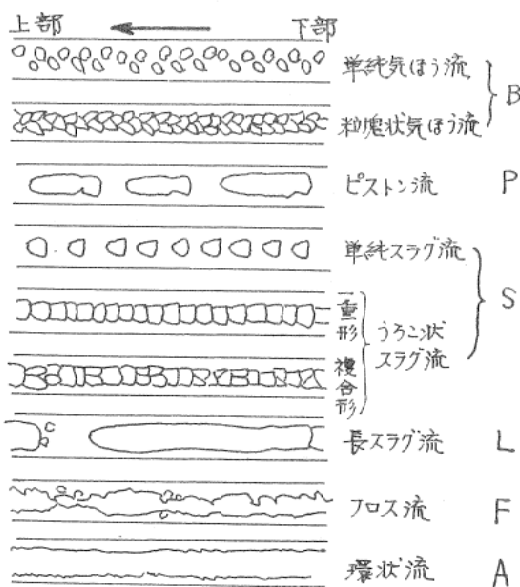


図5 細管における流動様式<sup>6)</sup>  
(垂直上昇流)

大きな影響を及ぼす場合には 特異な流動様式が現われる。図5に垂直細管における流動様式のスケッチが示されている<sup>6)</sup>。気ほう流より空気流量が増加すると、気ほう密度が濃密になって粒塊状気ほう流となりさらに気体スラグの長さのきわめて短かいうろこ状スラグ流になる。水平管においても、ピストン流、単純スラグ流の見られるのは細管における二相流の特徴である<sup>7)</sup>。

これらの気液二相断熱流の流動様式に対して、加熱沸騰流および冷却凝縮流の流動様式は相変化を伴うためにさらに複雑である。

図6に加熱沸騰流のスケッチが示されている<sup>8)</sup>。入口流体温度一定のもとで、加熱量が多

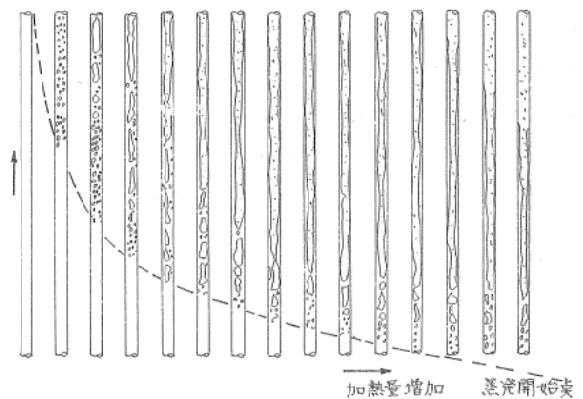


図6 加熱沸騰二相流の流動様式<sup>8)</sup>  
(入口流体温度一定)

くなるほど蒸発開始点は入口側に近づき出口乾き度は大きくなる。そして流動様式は液単相流より気ほう流、スラグ流、フロス流、環状流、噴霧流そして気体単相流へと変わっている。加熱沸騰流では、断熱流とはことなって沸騰現象などがあるので、さらに詳細に流動状態を観察してみる。加熱流では、伝熱面において気ほうの発生・生長・離脱が行なわれまた軸方向に流動様式が連続的に変化し、さらに上流で発生した気ほうが下流側で発生した気ほうと合体するなど上流側の流れが下流側に著しく影響するのが特徴である。対向した2面が加熱されている垂直矩形流路における沸騰流に関する詳細な研究<sup>9)</sup>によると、気ほう流、スラグ流、スラグ流と環状流の遷移段階のスラグアニュラ流、環状

流、バブリー・アニュラ流が観察されている。気ほう流では、伝熱面上での気ほうの発生、生長、離脱、それに上流からの気ほうが加わり軸方向に気ほう密度は高まり合体もみられる。断熱気ほう流にくらべて気ほう形状の歪みは大きく、気ほう径も広範囲に分布している。スラグ流では、気体スラグ周囲の液膜がかなり厚く、その液中で気ほうは生長し 気体スラグと合体するなど気体スラグを激しく変形させている。下流においては、気体スラグが沸騰による気体体積増加のため長くなり、前後の気体スラグは合体してスラグ・アニュラ流を経て環状流へと遷移している。このスラグ・アニュラ流でも核沸騰により生じた大気ほうが気体スラグ周囲の液膜中に存在している。さらに乾き度が増すと、管中心部を気体が高速で流れた液膜も薄くなる。したがって核沸騰による気ほうは小さく、液膜を押し上げるほどにはならない。大流量の場合に、環状流の蒸気コア部より細い直径で管中心部を蒸気が流れ、伝熱面で発生した気ほうが蒸気コア部に流入するバブリー・アニュラ流が見られる。

また冷却凝縮管内の二相流は沸騰流にくらべて比較的断熱二相流に近い流動様式を示している。R-12の水平管内における観察結果<sup>10)</sup>によると、主要な流動様式として噴霧流、環状流、半環状流、波状流、スラグ流、プラグ流があげられ、それらの遷移的な流動様式として噴霧・環状流・環状・波状流、半環状・波状流があげられている。図7にこれらのスケッチが示されている。まず凝縮量の少ない領域では、凝縮液は噴霧状になって蒸気中を流れ、管壁面上に液膜のほとんどない噴霧流が観察される。凝縮量が多くなると壁面上にごく薄い液膜がみられ、中心部を液滴を伴った蒸気の流れる噴霧環状流あるいは管上面では液膜のほとんど認められない噴霧・半環状流になる。これら環状流あるいは半環状流において、下部液膜厚さが厚く波状を呈している流れは、環状・波状流あるいは半環状・波状流と呼ばれている。

蒸気流速が速く、凝縮量の多い場合には、下部を液膜がそして上部を液体スラグと気体スラ

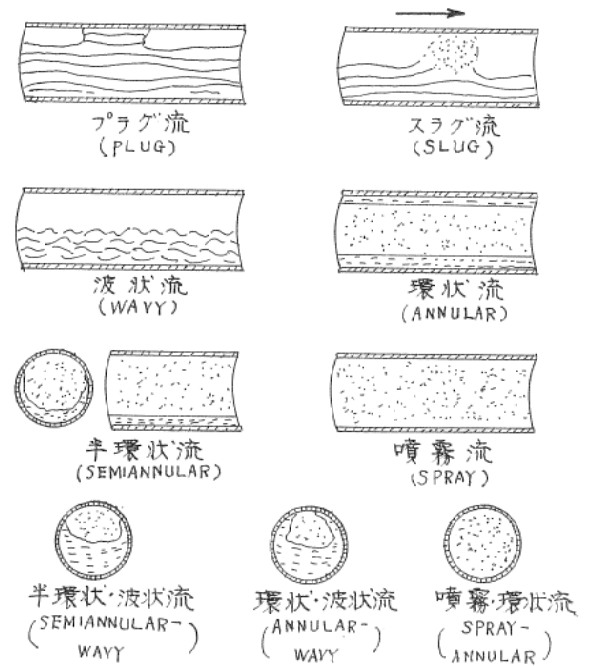


図7 冷却凝縮二相流の流動様式<sup>10)</sup>

グが交互に高速で流れるスラグ流となる。また蒸気流速が遅いと気液界面は上下に分離し、波のある波状流となる。さらに凝縮量が多くなると連続な液相中を管の上部にそって断続的に蒸気ほうの流れるプラグ流になる。

環状流において、液膜厚さが円周方向で極端にことなるのは、断熱流では見られない特異な流れで、管壁全面で凝縮が生じ、それに重力の作用が重なるために生ずるものである。また沸騰流とはことなり液膜中に蒸気ほうを含むこともなく比較のおだやかな流れである。

流動状態をこのようにその幾何学的形状から分類して気ほう流、スラグ流などのニックネームが付けられている。これらを両相の相対関係で分類してみると、まず両相が分離している流れ（分離流）とよく混合している流れ（分散流）に大別される。分離流は、その分離の仕方によって、軸方向分離流（スラグ流）、半径方向分離流（環状流）、円周方向分離流（リブレット流）、上下方向分離流（層状流）に分かれる。そして各分離流は、その気液界面の状態が滑かであるか、粗状であるか、さらに激しく乱れて裂状を示しているかに細分される。一方分散流は、液体中に気体の分散している気体分散

流（気ほう流）とその逆の液体分散流（噴霧流）に分かれる。これら基本的流動様式が、各種条件のもとで、交錯し合って複雑な二相流の流動状態を現出している。

以上の名称、分類は、いずれも個人の目視観察・判定によっているため、主観が介入しやすく、各研究者の結果が必ずしも一致していない。したがって主観の介入しない判定方法の開発が急がれている。

5) 管内を流動している気液二相流は、いまだの流動様式で流れているのか。

管内のある位置において、気液二相流は、気ほう流、スラグ流、環状流などの多くの流動様式のうちいずれか一つの流動様式で流動しているはずである。対象としている二相流がどの流動様式で流れているかを推定したり、また特定の流動様式を出現させるために各種因子を決定したりするためには、各流動様式と各種因子との関係をは握しておかなければならない。一般に各種流動様式の存在領域を示した線図を流動様式線図と呼んでいる。現在のところ、流動様式線図は実験的に求められている。したがって各研究者の主観が介入するために、各実験で境界線がことなり、全ての実験を満足させる線図はまだできていない。また各図において境界は線よりむしろ帯で示されることが多い。ここでは代表的な流動様式線図を数例示す。

図8に垂直な上昇管における断熱気液二相流の流動様式線図が示されている<sup>11)</sup>。ここで

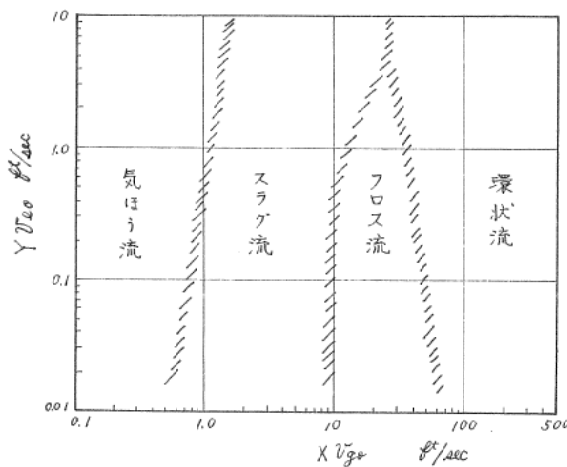


図8 垂直上昇管における断熱気液二相流の流動様式線図<sup>11)</sup>

$$Y = (\rho_e \sigma_{wa} / \rho_w \sigma)^{1/4}, X = (\rho_g / \rho_a)^{1/3} Y \quad (4), (5)$$

$\rho_e, \rho_g$  = 流動条件での液体・気体の密度,  $\sigma$  = 流動条件での気-液界面張力,  $\sigma_{wa}$  = 標準状態 (60°F, 14.65 psia) での水-空気系の界面張力,  $\rho_a$  = 標準状態での空気の密度である。X, Y は密度, 表面張力の影響を考慮するための係数である。なお標準状態の空気-水系では  $X=Y=1$  となる。したがって、みかけ空気速度  $v_{ao}=10\text{ft/sec}$ , みかけ水速度  $v_{wo}=1.0\text{ft/sec}$  の場合、流動様式は、スラグ流であり、 $v_{ao}$  が 20 ft/sec になるとフロス流,  $v_{ao}=80\text{ft/sec}$  では環状流になることがわかる。

図9に、水平管内断熱気液二相流に対する流動様式線図が示されている<sup>12)13)</sup>。ここで  $G_e, G_g$  は液体, 気体の質量流速 ( $\text{lb/h ft}^2$ ),  $\lambda_B = [(\rho_g / \rho_a)(\rho_e / \rho_w)]^{0.5}$ ,  $\psi_B = (\rho_{wa} / \rho)[(\mu_e / \mu_w)(\rho_w / \rho_e)^2]^{1/3}$ ,  $\mu_e$  = 流動条件での液体の粘性係数,  $\mu_w$  = 標準状態での水の粘性係数である。

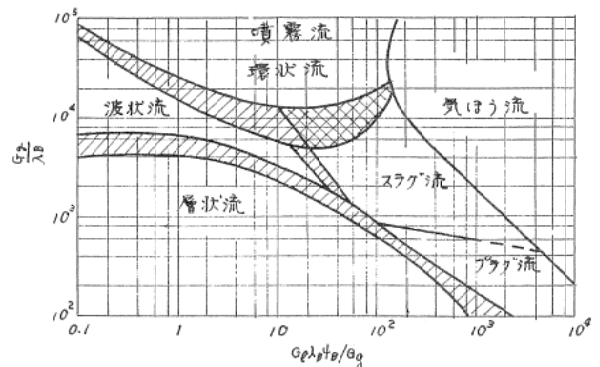


図9 水平管内断熱気液二相流の流動様式線図<sup>12)13)</sup>

$\lambda_B, \psi_B$  は密度, 表面張力, 粘性係数を補正する係数である。空気-水系では  $\lambda_B = \psi_B = 1$  となる。したがって  $G_e / G_g = 1$  に対して、 $G_g$  を  $10^3$  とすると層状流が、 $10^4$  にすると波状流がさらに空気流量を増加させると環状流あるいは噴霧流がえられる。

細管内での断熱気液二相流の流動様式線図が図10に示されている<sup>6)</sup>。図5に示された各流動様式の領域が、気・液各みかけ速度  $v_{go}, v_{eo}$  に対して示されている。 $v_{eo}=0.5\text{m/s}$  で  $v_{go}$  を  $0.5\text{m/s}$  にすると気ほう流<sup>⑧</sup>, 流体流量を増す

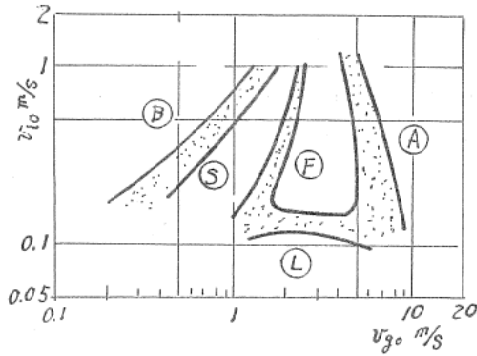


図10 細管内の気液二相流の流動様式線図<sup>6)</sup>

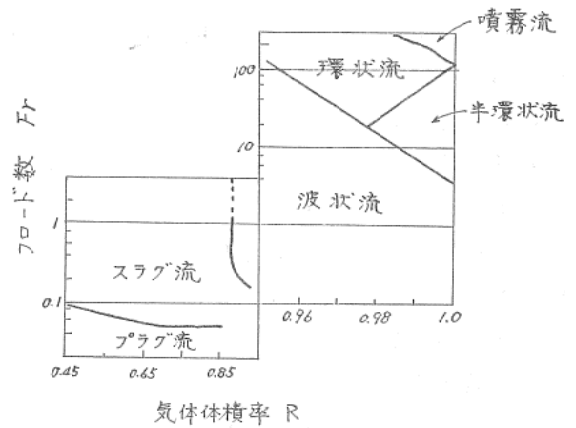


図12 冷却凝縮二相流の流動様式<sup>10)</sup>

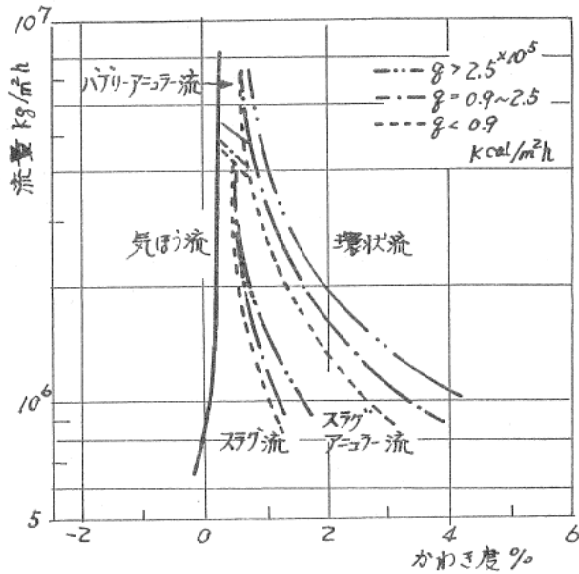


図11 加熱沸騰二相流の流動様式線図<sup>9)</sup>

と遷移領域を経てスラグ流<sup>⑤</sup> さらに  $v_{g0} = 10$  m/s では環状流<sup>④</sup>になる。

以上の断熱気液二相流に対して図11には、加熱沸騰二相流の流動様式線図が示されている<sup>9)</sup>。流量  $4 \times 10^6$  kg/m<sup>2</sup>h で乾き度が0の場合には壁面近辺の過熱液層内に気ほうが見られ気ほう流となっている。乾き度の増加とともにスラグ流、スラグ・アニユラ流を経て乾き度1%余りで環状流になることがわかる。また熱負荷の大きいほど高乾き度でスラグ・アニユラ流、環状流への遷移が起っていることが示されている。

図12に冷却凝縮二相流に対する流動様式線図が示されている<sup>10)</sup>。座標には次式

$$Fr = \frac{(v_{g0} + v_{e0})^2}{gD} \quad (6)$$

$$R = \frac{v_{g0}}{v_{e0} + v_{g0}} \quad (7)$$

で定義されるフロード数  $Fr$  と気体体積比  $R$  が用いられている。環状流、半環状流、噴霧流は比較的高いフロード数 ( $Fr > 10$ )、大きい気体体積比 ( $R > 0.96$ ) で起り、低いフロード数、小さい気体体積率ではプラグ流、スラグ流が起ることが示されている。

### あとがき

気液二相流に関しては、流動様式以外に圧力損失、ボイド率の算出方法をはじめとしてきわめて多くの問題があるにもかかわらず、ここではそのごく一部にしかすぎない流動様式の問題のみを記すにとどまったことを申しわけなく思います。二相流についての単行本が最近出版されているので、それを末尾に記して本稿を終ります。

Tong, L. S., Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow.(1965), John Wiley & sons.

Soo, S. L., Fluid Dynamics of Multiphase System. (1967). Blaisdeed Publishing Co.

Wallis, G. B., One-dimensional Two-Phase Flow. (1969), McGraw-Hill.

Hewitt, G. F. and Hall-Taylor, N. S., Annular Two-Phase Flow(1970), Pergamon Press.

Govier, G. W., and Aziz, K., The Flow of Complex Mixtures in Pipes.



(1972), Van Nostrand Reinhold Co.

## 引用文献

- 1) 世古口, 配管技術, 4 (昭和44-4), 77
- 2) Zukoski, E. E., J. Fluid Mech., 25, (1966), 821
- 3) Alves, G. E., Chem. Engng. Prog., 50-9, (1954-9), 449.
- 4) 赤川ら, 機械学会論文集, 36-290 (昭和45-10), 1712.
- 5) Banerjee, S., ら Canad. J. Chem. Engng., 47-5, (1969-10), 445.
- 6) 大矢, 機械学会論文集, 37-296 (昭和45-4), 779.
- 7) 赤川ら, 機械学会関西支部 第38期定時総会講演会前刷, (昭和38-3), 147.
- 8) Hewitt, G. F. and Hall-Taylor N. S., Annular Two-Phase Flow, 19, (1970) Pergamon Press.
- 9) 佐藤ら, 機械学会論文集, 38-310 (昭和47-6), 1478.
- 10) Soliman, H. M. and Azer, N. R., Trans, ASHRAE, 77, Pt 1 (1971), 210.
- 11) Gqvier, G. W. and Aziz, K., The Flow of Complex Mixtures in Pipes. 337, (1972), Van Nostrand Reinhold Co.
- 12) Baker, O., Oil and Gas J., 53, (1954), 185.
- 13) Scott, D. S., Advances in Chemical Engineering, Vol. 4, (1963). p. 209. Academic Press.