

甲藤好郎先生ご遺稿
「沸騰の科学（7）」
Science of Boiling (7)

甲藤 好郎（東京大学名誉教授）

Yoshiro KATTO (Professor Emeritus of The University of Tokyo)

7. 気液の蜜月旅行

現代に活躍する気液二相の流れ

家の近くで水道工事があった直後など、水道の蛇口をひねると空気と水と一緒に勢いよく飛び出して来ることがあります。またジュースをストローで飲む時、あまり行儀よくありませんがコップの底に残り少なくなったのを無理に吸うと、ポコポコと音がして空気とジュースがストローの中を交互に上がって来ます。その他、コーヒーをパーコレーターで入れる時なども気液の混じった流れが見られましょう。いずれにせよ、このような場合、一つの流路の中を気体と液体の二つの相が同時に流れるわけで、こうした流れを一般に管内の気液二相流（にそうりゅう）と言います。この二相流は、管内を空気だけ、または水だけが流れると言った单相流（たんそうりゅう）に比べて随分複雑になりますが、現代の科学技術の世界では非常に重要な流れなのです。ごく身近な例をあげてみても、たとえば私たちの家庭にある電気冷蔵庫の中では、低温の庫内から熱をとり庫外へ運び出すための特別な流体（冷媒と言います）が蒸発と凝縮を繰り返しながら流れていて、二相流を作っています。巨大なスケールのもものでは、火力発電所や原子力発電所で水が沸騰、あるいは凝縮しながら流れ、ここにも二相流が流れています。また現在、計画の進んでいる宇宙基地では、実験室や人間居住区内部に発生する熱を取り去って、宇宙空間に捨てるための放熱パネルまで送るループには効率のよい二相流が使われる筈です。しかも、これらの流れは熱を吸収したり、放出したりする重要な場所に関係しているのです。

ところで私たちは、これまで容器内にある液体の単純な沸騰、つまり「プール沸騰」を中心に沸騰現象を見てきました。そしていよいよこれから、

ボイラーや沸騰水型原子炉などの中に生じている沸騰の特徴的な事柄についてお話する段階に来たわけですが、これらの装置の中ではボイラーの蒸発管（外側を火炎や燃焼ガスにさらしながら内部を水が通っている）とか、発熱している原子炉燃料棒の間の通路（そこを水などの冷却材が流れている）とか、一般に高温の壁面に囲まれた長い流路内を液体が流れながら、その壁面に触れて加熱され沸騰しているのです。こういう風に流路内の強制的な流れに生じる沸騰を、流路内の「強制流動沸騰」といい、時には「流れの沸騰」と言うこともあります。いずれにせよ流路内には、蒸気と液体と一緒に流れる二相流が現われます。従って、そのような流路内に生じる沸騰の話（8章）に入る前に本章で、管内の二相流というものの性格について簡単な解説をして置くことにしましょう。

流れのパターン

いま話を分かりやすくするため、垂直に立てた長い円管（ただし非加熱）の中を上向きに、空気と水と一緒に流れている時を考えてみて下さい。この場合、誰でもまず気になるのは、空気が水の中に泡の形で含まれて流れるのか、あるいは空気と水が別々になって流れるのか、などといった二相の流れの姿ですが、一般にそれを「流動様式」あるいは「流れのパターン」と言っています。そしてこの流動様式は、例えば長いガラス管を立てた中に、下から空気と水を流し込んで観察することが出来ます。もちろん、空気や水を流し込む場所からしばらくの間の流れの様子は、それらの流し込み方でいろいろ違って来ますし、また管の長さ方向にも様子が変わって行きますが、十分な長さを経ると、やがて一定の自然な流れの状態に落ち着く筈で、このようになった流れを流体力学的

に平衡状態になった流れ、あるいは簡単に「流力平衡状態」の流れとっています。

さて、こうして観察される非加熱管内の流動様式、つまり流れのパターンには、最も大切な基本形式として、3つのパターンがあります。まず、水の流量に比べて空気の流量が比較的少ない時、空気が小さな泡となって液中に分散した形の流れが現われ、これを気泡流（きほうりゅう）と言います。液中に分散する気泡の大きさと個数、また円管の断面上に気泡がどのように分布して流れるかなど、いろいろの問題がありますが一括して気泡流と言います。

次に、空気の流量がもっと増えると、前とは大分違った流れのパターンに変わります。すなわち空気が部分的に集まって、管断面をほぼ満たす大きさの、先の丸い砲弾状のかたまりになり、それらがある間隔毎に管の長さ方向に並び、その気体のかたまりとかたまりの間に水（その中に小さな気泡が分散していることもあります）がはさまって流れる様式です。これを一般に「スラグ流（スラグリゅう）」または「プラグ流」と言います。スラグとは、節（ふし）のことであり、またプラグは栓で、いずれにせよ前述の流れの様子はそれらに似ています。なお、もう少し空気の流量が多くなると、このスラグ流にかなり似ていますもの、もっと乱れて不規則な形の流れとなり、これは「チャーンス流」と呼ばれています。チャーンスとは英語であわ立ちのことで、だから前記スラグ流の場合の大きな砲弾状の泡がもっと細長く、かつ形が乱れた不規則なものになり、やがては次に述べる第3番目の基本形式の流れにつながっていくのです。

すなわち、空気の流量がさらにずっと多くなると、水の流れは管壁側に押し退けられ、つまり水は壁面に沿う薄い層の形で流れ、空気は円管断面の中央部を大きく占めて高速で流れるようになります。この様式の流れを「環状流（かんじょうりゅう）」と言いますが、壁面に沿う水層の流れと中心気流の間の界面となる水面は一般に乱れています。そして流速の速い時は、その水面から飛び出す水滴が中心気流に乗って流れる一方、中心気流の方から水面に飛び込み水層の流れに捕えられる水滴もあると言った状況になります。この様式の流れを「環状噴霧流」と言うこともあります、こ

の流れが流体力学的に平衡な状態に落ち着いた後は、水面を出入する水滴の量が互いに釣り合い、壁面に沿って流れる水量、および中心気流と一緒に流れる水滴の量は、それぞれ管の長さ方向に変化せず一定に保たれることとなります。

もちろん、いまお話して来たいろいろの流れのパターンは、空気と水の時だけに限るわけではありません。そして最近では、気体と液体がどんな条件の時、どのパターンになるのかを、前もって大体知ることが出来るようになって来ています。また以上は垂直管についての話ですが、水平管の場合は、液体の流量が少ない時、重力の影響で気体が管の上部に、液体が下部に分離して流れる傾向があり、またその分離した部分の間の界面に生じる波の問題などがあって、流れのパターンはその種類も含めてもう少し複雑になることを申し添えておきましょう。

管内の流れに生じる圧力損失

さて、空気であろうと水であろうと、あるいはガス、油、何であっても流体が管内を流れる時、摩擦などのため、管の入口から出口まで必ず流体の圧力が減って行きます。だから管の入口では、それだけ圧力を高くしておかないと、必要な量の流体を流すことが出来ません。例えば人がストローの一端を口にくわえて空気を吹く時、その人の口の中の圧力は大気圧より少し高くなっているのです。ストロー内を空気が流れるのです。また逆にストローの一端を口にくわえて空気を吸う時は、口の中の圧力は大気圧より少し低くなっています。

ともあれ、これからは簡単のため管内の定常的な流れを考えることにしますが、いま内壁面の滑らかで長さが L 、直径が d の寸法を持つ円管があるとしましょう。そしてまず、この管内に空気だけが流れるとか、あるいは水だけが流れるいわゆる単相流の場合は、その流体の密度を ρ 、また管内平均流速を u_m とすると、流れの摩擦による入口、出口間の圧力差 Δp を次式で簡単に求めることが出来ます。すなわち

$$\Delta p = f \left(\frac{L}{d} \right) \frac{\rho u_m^2}{2}$$

この式の右辺で、 f は一般に管摩擦係数と呼ばれ

ている係数ですが、この値は以下のようにして求められます。すなわち、いま流れている流体の粘性係数（流体の粘さを表す数）を μ とすると、一般にレイノルズ数と呼ばれている量 $\rho u_m d / \mu$ （これは、いわば流れの勢いが持つ力を粘性力と比べた値です）の値が定まります。このレイノルズ数の値を計算する時、これに含まれる密度 ρ や、流速 u_m や、直径 d や、粘性係数 μ のそれぞれの値を表すのに必要な「質量」、「長さ」、「時間」の各単位について、例えば「質量」をキログラムなら全部キログラム、ポンドなら全部ポンド、また「時間」も秒なら全部秒、分なら全部分で測るようにすれば、「質量」、「長さ」、「時間」にそれぞれどんな単位を使おうとも、レイノルズ数の値からは単位が消えてしまい、そして常に同一の値になるのです。このような数のことを一般に無次元数（むじげんすう）と言い、自然法則はすべて、こういう無次元数の間の関係として表されます。と言うのは、自然の法則は人間の作った単位には関係なく客観的に成立すべきものだからです。そして実際、前述の管摩擦係数 f の値もこのレイノルズ数だけの関数として、流体の物質には関係無く一義的に定まることが知られています。

なお普通、管内の流れのレイノルズ数の値が2300より低いと、流体は管内を整然と層をなして流れ、これを「層流」と言います。また流れのレイノルズ数がこれよりもっと大きいと、流体は管内を乱れながら流れるようになり、これを「乱流」と呼びます。このように、壁面摩擦の影響をうける流れには一般に層流と乱流があり、しかもそれを前述の無次元数 $\rho u_m d / \mu$ の値で区別出来ることは、イギリスのマンチェスター大学のレイノルズ教授(1842-1912)が1883年に発見したもので、その端緒はガラス管内の水流中に、染色した水の細い流れを流し込む方法によったものです。なおレイノルズ教授はその論文の中で、層流に対しては整然と行進する軍隊を、一方、乱流に対しては戦い敗れ無秩序に敗走する軍隊の姿を思い浮かべていますが、ひょっとするとワーテルローの戦(1815年、イギリス軍とプロイセン軍がナポレオン軍を撃破)などが念頭にあったかも知れません。なお、前述の実験のように流れの状態を目に見えるようにすることを、ちょっと難しい言い方ですが、流れの可視化（かしか）と言い、流れの研究

に役立つ一つの重要な手段なのです。

気液二相流に生じる圧力損失

ところで管内の気液二相流の場合、管の入口、出口間に生じる圧力差は、管内を気体と液体が一緒に流れていますから、単相流の場合のように簡単には行きません。また流れのパターンによっても様子が違って来る筈です。そこで従来いろいろの研究がありますが、ここには二相流の圧力損失の予測法について、まず大胆なものを紹介しましょう。

いま一つの円管内を気液の二相流が流れている状況の下に、入口、出口間に実際に生じる圧力差が Δp であるとします。この時ももちろん、管内を流れている気体の流量、液体の流量はそれぞれ決まっているわけですが、いま圧力差の計算の手がかりにするため、仮にその気体だけが、その気体の流量のまま今の円管内を単独で流れている場合を仮想しますと、この時の管の入口、出口間の圧力差 Δp_G は前項の単相流の式で容易に求められます。そしてこの手がかりの圧力差 Δp_G を基準にして測った実際の圧力差 $\Delta p / \Delta p_G$ の値は一応、前述の気相だけの流れに液体の流れが加わった時の影響の度合いを示す数とみなせましょう。そして、この影響の度合いは、液体だけが同じ円管内を単独に流れると仮想した時の圧力差 Δp_L （これも前の単相流の式で容易に求められます）を、前述の手がかりの圧力差 Δp_G を基準に測った値 $\Delta p_L / \Delta p_G$ の大小に関係すると考えて、少なくとも大体の方向は示せるでしょう。このことを式の形で書けば

$$\Delta p / \Delta p_G = \text{func}(\Delta p_L / \Delta p_G)$$

ここに $\text{func}()$ は $\Delta p_L / \Delta p_G$ の関数(function)という意味です。そして実際に二相流の実験結果を調べてみると、この式の関係が大まかには成立つことが分り、関数 $\text{func}()$ の具体的な形が近似的に求められています。すなわち次の簡単な形の式が一例です。

$$\text{func}(\Delta p_L / \Delta p_G) = 1 + C \cdot (\Delta p_L / \Delta p_G)^{1/2} + \Delta p_L / \Delta p_G$$

ここで右辺に含まれる C の値は、前述のようにして単相流の式で計算した液相および気相の各単独流れが、それぞれ層流、乱流のどれになるのか(層流か乱流かの区別は前述のようにレイノルズ数の値ですぐわかります)の全組合せに対して次のよ

うに与えられています。

| | | | | |
|-----------|----|----|----|----|
| 液相の仮想単独流れ | 乱流 | 層流 | 乱流 | 層流 |
| 気相の仮想単独流れ | 乱流 | 乱流 | 層流 | 層流 |
| C の値 | 21 | 12 | 10 | 5 |

なお、前の式の左右両辺を $\Delta p_L / \Delta p_G$ で割って、次の形に書き変えることも出来ます。

$$\Delta p / \Delta p_L = \text{func}(\Delta p_L / \Delta p_G) / \Delta p_L / \Delta p_G$$

この左辺は、管内を液体だけが単独に流れるとした時の圧力差 Δp_L を基準に測った実際の圧力差 Δp の形になっていますが、もちろんこの式を使っても前と同じ Δp の値が得られます。

要するに、これらの式を使って、私たちは二相流の摩擦圧力損失 Δp を近似的に予測することが出来ることとなります。そしてこれは、いまから40数年も以前(1949年)、ロックハートとマルチネリが提案した方法ですが、二相流の知識が貧しかった当時であればこそ、こんな大胆な考え方が出来たのでしょう。現在から見れば不十分な方法ですが、それでも便利なのでまだよく利用されています。

環状流の場合

前項でお話した二相流の圧力損失の予測法は、随分大まかなものとは言え、ある意味で巧みなものとも言えましょう。ただししかし取り扱いが何となく形式的で、実際の流れの物理的状況とのつながりが希薄な点に、不満を抱く人がおられるでしょう。そこで次は、むしろ流れの具体的状況に注目する簡単な予測方法の例を一つ紹介しておきましょう。

これは環状流の場合に限ります。環状流は前にお話したように、管壁に沿う薄い液層の流れと、中心気流とから成っていますが、いま中心気流の流速が十分に大きい場合を考えましょう。この時、中心気流に注目してみますと、それは周囲を波立つ液層表面に囲まれて流れていますから、さながら内面の粗い円管内を流れている気流の状況に近いわけです。

ところで、内面が滑らかな円管内を気流だけが流れる時、その入口、出口間の圧力差 Δp は一般に前々項の単相流の式で計算出来るのですが、もし円管がいま考えているように粗い管の場合は、

流速が十分高ければ、管摩擦係数 f の値が、管内面の粗さ ε を管直径 d で割った値 ε/d (これを相対粗さと言います) だけの関数としてほぼ決ることが知られています。そして問題は、こうした粗面管の特性が、環状流の中心気流の場合にも見られるかどうかですが、少なくとも近似的にはそう考えてもいいようで、環状流の実験データから管摩擦係数 f の値を調べた結果として、最近求められた式を掲げておきましょう。

$$f = 0.02 + 1624(\delta/d)^{2.04}$$

ここに、 δ は管壁に沿う液層の流れの平均厚さ、 d は管の直径です。環状流の観測結果によると、気液界面の波の高さは、管壁に沿う液層の流れの平均厚さ δ と深いかかわりがあるとの報告がありますから、この式に含まれている δ/d は、前の粗面管の相対粗さ ε/d に対応するものと言えましょう。

ともあれ一例として、いま次のような計算を試みましょう。すなわち、直径 d が50ミリメートルの滑らかな円管の中を、まず空気(大気圧、温度20°C)だけが毎秒20メートルの平均流速で流れているとしましょう。この時、レイノルズ数の値は64,100と計算され、これから管摩擦係数 f の値は約0.02と定まります。次に、環状流の場合として、前と同じ管内に、いま厚さ0.5ミリメートルのごく薄い液層が管壁に沿って同時に流れているとします。この時の管摩擦係数 f の値は、 f に関する前の経験式の δ/d にその値0.5/50を入れて直ちに0.155と求められます。つまり、管内にまったく同じ量の空気を流しているのに、管壁の上に僅か厚さ0.5ミリメートルの液体があるだけで摩擦損失が前の7.75倍にも増加してしまうことが分かります。

そこでいま例えば地熱発電所を考えてみましょう。地熱発電所では多くの場合、方々に掘った井戸から出る蒸気を中心部にある発電所まで相当の距離を送気管で送らねばなりません。地下から出る蒸気は一般に飽和蒸気であり、かつ熱水を含んでいることが多く、それゆえ送気管内で前に記したような環状流の状況を起こしやすい訳です。従ってこれをそのままの状態にすると、送気管内の圧力損失が大きくなり、それだけで発電所の出力が減るので特に注意が必要になるのです。

逆に流れる気液二相流

これまでは液体と気体が一つの管内を仲よく同じ方向に流れる場合を見てきました。人間にたとえれば、新婚夫婦の蜜月旅行のようなものです。しかし長い人生の間には、夫婦といっても互いに意見が食違うようなことが、たまにはあるかも知れません。そして中には、一方が東へ行くのに、他方は西へ向かって歩くといった状態になってしまうケースが無いとは言えません。

ところで気液二相流を構成する気体と液体の間にも、実はそんなことが時にはあるのです。つまり一つの流路の中を気体と液体が互いに逆方向に流れるわけで、例えば不注意な空だきをしたために高温になった風呂の湯沸し器の通水管の中に、あわてて冷水を流し込むような場合、通水管内で発生する蒸気はかなりの勢いで逆向きに流出して来て水の流入を妨げることになりましょう。ともあれ、このように液体と気体が対向して逆向きに流れる二相流は非常に重要な技術問題になる訳で、その基礎研究のため次のような実験装置を作ってみることにしましょう。

すなわち、ある長さの円管を垂直に立てて、上の方から液体が管の内壁に沿って薄い液膜状で流れ落ちるようにします。そのためには、液体供給用の上部容器を用意し、その底面の孔に円管の上端をつなぎ、上部容器に外部から液体を定常的に補給するにすれば、液体は自然に管内に流れ込むでしょう。あるいはまた、そうした上部容器を使わず、その代わりに垂直円管の上の方の一部管壁を多孔質の壁（金属粉を焼き固めて容易に作れるもので沢山の微小な隙間を持っています）とし、その壁を通して外から液体を管内に流し込む方法もあります。

そして次に、垂直円管の下端を別の下部容器につなぎ、その下部容器に外部の圧縮機などから気体を供給すれば、垂直管の中心部を上向きに気体の流れようになります。このとき、この下部容器には管内壁に沿って流れ落ちて来る液体が流入することになりますが、下部容器内の気圧（気体を垂直管内に上向きに流すのに必要）を下げずに、上記の流入液体が容器外へ流れ出せるようにするのは技術的に可能です。そしてこのようにして、垂直円管内に液体と気体が互いに逆向きに流れる定常的な二相流を作り出すことが出来ることにな

ります。

フラディング現象

さて前述のようにして作った垂直円管内の気液の対向流（たいこうりゅう）において、上から流下して来る液体の流量を一定にしておいて、上昇する気体の流量を少しずつ増していく実験を試みましょう。すると、気体流量がある値になるまでは、管壁に沿って流下する液膜流の流量は元のままで少しも変わりません。しかし気体の流量がある限界値 G_m を超えると、下向きの液膜流の流量は減り始め、それからさらに気体の流量が増すと、やがて下向きの液膜流が無くなって、垂直管内には上向き気流だけになってしまう、そういう現象が観察されます。

あるいはまた、前項でお話したように円管途中の多孔質壁の部分から液体を管内に流し込む場合は、気体流量がある限界値 G_m を超えると、供給液体の一部が多孔質壁の場所から管内壁に沿って上向きに流れ始め、さらに気体流量が増すと、やがて多孔質壁の場所から管内に供給される液体全部が上向きに流れるようになるわけです。

こうして、いずれにせよ管内を上昇する気体の流量が、ある限界値 G_m を超えて大きくなると、管内壁に沿う液膜の下向き流れが減少し始め、やがてその下向き液膜流がまったく無くなってしまふという現象が生じます。そして普通、下向きの液膜流の流量が減少し始める限界（換言すれば下向きの液膜流の一部が上向きに流れ始める限界）のことを「フラディングの開始」、または簡単に「フラディング」と呼びますが、最近では「対向流限界」と言う人もあります。ここに「フラディング」とは洪水のように液体が溢れることを言います。そして、この「フラディング」ないし「対向流限界」の現象は、何らかの事故で空だき状態が生じて高温になった原子炉の炉心に上方から緊急に水を注入して冷やそうとする時など、高温壁に触れて発生する蒸気の逆流が後続の水の流入を妨げる問題をはじめ、いくつかの大切な機器や装置の作動限界や安全性とからむ重要な現象なのです。

①「フラディング現象の発生原因」

では、このフラディング現象はどんな原因で発生するのでしょうか。一見、これは簡単なことであり、つまり管内を上昇する気流がその摩擦力で

液膜の流れを引き上げるために起こるように見えます。しかし、実はそうではないのです。実際、フラディングを発生させる時の気体流量は、実験の結果によると、液膜の流量が多い時の方がかえって小さく、またそれに、管上方の液流入部の形状、および管下方の液体流出端の形状の影響を受けていろいろ変化するのです。また状況によっては、気流が限界値 G_m に来ると、前述のような過渡現象を経ないで、下向き液膜流がほとんど瞬間的に無くなる（つまり液体のすべてが、ほとんど瞬間的に上向きに流れるようになる）こともあるのです。

そして、フラディング発生時の気液の様子を観察した結果によると、次のような状況が見られます。すなわち、上向きの気流の流量がある程度大きくなると、管下端ないしその近くで、管壁に沿って流下している液膜流の表面に波のような擾乱が急に生じます。そして、それがさらに気流流量の増加と共に成長し、大きくなった波がやがて気流によって上向きに押し上げられるようになってフラディング現象が発生しています。またこの時、乱れた波は上方へ押し上げられるだけでなく、その波面から液滴を気流中に飛出させ、その液滴が気流によって上方へ持ち去られる現象も加わっています。

なお、垂直管の下の方の一部管壁を多孔質壁にして、上方から流下して来る液膜流をそこで外へ吸い出すようにした実験では、フラディング発生限界に対し、管長（すなわち液体の流入部から流出部までの距離）の著しい影響が現われ、管長が短いほどフラディングが起こりにくくなるという

特徴を示します。そして、これは下方の多孔質管壁からの液体の吸出しのため、液膜流の波の波長がそこで抑えられる結果であろうと推定されます。

②「管径の影響」

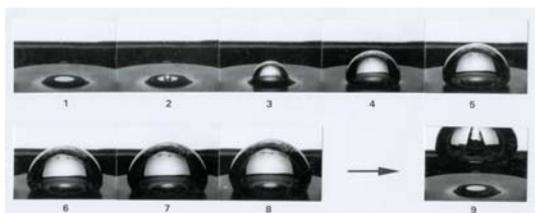
なお終わりに、フラディングに対する管径の影響について2つの事柄を付け加えておきましょう。

第1は、管壁に沿って流下する液膜表面に生じる波の高さは、限りなく大きくなり得るものではありません。従って管径が非常に大きくなると、管径が比較的小さい場合に比べてフラディングの性格がかなり違ったものになります。

また第2、対向二相流が流れている垂直管の下端の状況を考えてみると、管壁に沿って流下してきた液膜流が出口端から円筒の形をとって流出し、従って、その流出液膜流を周囲から気体が貫き破って管内へ流入して来るという原理になります。そのため、もし管径が小さいと表面張力の作用も加わって、液体が出口をふさいでしまい易く、換言すれば定常的な対向二相流が最初から作れない（換言すれば最初からフラディング現象が起こってしまう）ようなことになるでしょう。これを避けるには、垂直管の下方出口端から外に広がるフランジ面を付けるなどして、流出してくる液体がフランジ面を濡らしながら周辺方向に広がって流れるようにすれば、気体は液体に邪魔されずに管内に自由に流入できるようになります。

(次号に続く)

(図と写真は元東京大学伝熱工学研究室横谷定雄氏提供)



低圧沸騰：
典型的な気泡の成長過程（上図）と限界熱流束（CHF）の系圧力による変化（右図）

