

気泡、液滴との半世紀



随 筆

片 岡 勲*

Half Century with Bubble and Droplet

Key Words : Bubble, Droplet, Two-Phase Flow

早いもので、私が大学4年生で研究室にはいり、水と気泡の流れや空気と液滴の流れといった気液二相流の研究を始めてから半世紀近くになる。気泡や液滴といったはかなく消え去るものの代表のようなものと付き合って自分自身はいまだに消え去ることなく研究を続けることができるのはありがたい限りであり、気泡や液滴に感謝しつつ毎日を送っている。

気液二相流は気体と液体が混在する流れであり、工学分野だけでなく、医学、理学、農学など様々な学問分野において現れる流れであり、自然現象（雨や海の波など）や調理（鍋やかんでの沸騰）など私たちの身近に日常的に現れる流れである。気液二相流の特徴は言うまでもなく気体と液体の界面が存在することであり、固気二相流（固体と気体が混在する流れ、砂嵐や穀物の空気輸送などに現れる流れ）や固液二相流（固体と液体が混在する流れ、土石流や流動層などの流れ）と異なり気液界面が様々な変形するため極めて多岐に亘る流れの構造（流動様式）が現れる事である。垂直の管内を流れる気液二相流の流動様式の一例を第1図に示す。勿論これは代表的な流動様式であって、気体と液体の流量、流路の径、流路の形状、流れの方向、流体の種類によってこのほかにも非常に多くの流動様式があり、自由噴流（ウォータージェット）などの管内流以外の流動様式も数多く存在する。

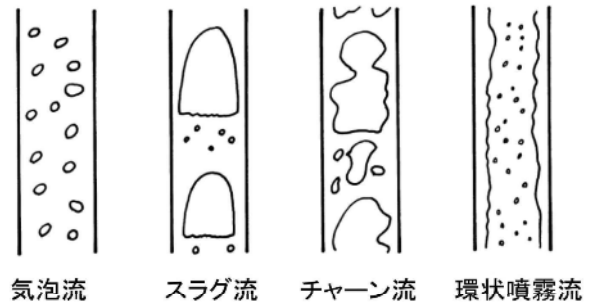


図1

こうした気液界面構造によって気液二相流は水だけが流れるような単相流に比べて、極めて複雑な流れの特性を示すだけでなく、熱の輸送や物質の輸送の特性も複雑で多岐にわたり、実験的にも解析的にもいまだに多くの興味深い研究課題が残されている。私が40年以上も研究を続けて来られたのもこうした気液二相流の多様性のおかげである。

工学において気液二相流は沸騰を伴う流れに関連して取り扱われる場合が多く、産業革命以来、その特性は蒸気機関をはじめとして相変化を伴う熱機関（エンジン）の設計上重要であった。その意味では気液二相流は工学（エンジニアリング）と起源を一にしているといつてよいであろう。しかしながら初期のボイラーや蒸気機関では、熱負荷（伝熱面からの単位面積、単位時間あたりに流れ出る熱量）が小さいため、詳細な気液二相流の流動と伝熱特性の評価は必要ではなく、気液二相流の研究はそれほど進められることはなかった。気液二相流の研究が本格的に進められるようになったのは、第二次世界大戦後の約70年ほど前からである。このころになると、非常に高性能のボイラーが出現するようになり、また、原子炉の開発も始まった。高性能ボイラーや原子炉は高温、高圧で運転され、熱負荷も極めて大きく、適切に設計しなければ、伝熱面が損傷してしま



* Isao KATAOKA

1951年3月生
 京都大学大学院工学研究科修士課程原子核工学専攻修了（1975年）
 現在、福井工業大学 工学部 機械工学科 教授 工学博士 熱流動工学
 TEL : 0776-29-2481
 FAX : 0776-29-2481
 E-mail : kataoka@fukui-ut.ac.jp

う可能性が出てきた。そのため、気液二相流の流動と伝熱特性を正確に評価することが必要となり、気液二相流の研究が精力的に行われるようになった。初期の研究は実験が中心であり主として管内流について流動様式、圧力損失、ボイド率、熱伝達係数、限界熱流束といった基本的な現象についての知見が蓄積されるとともに、実験データに基づいた相関式が開発され設計に用いられた。その後こうした実験結果や相関式を合理的に説明するためのモデルや解析手法が開発された。また気液二相流現象を支配する基礎方程式も確立された。気液二相流の基礎方程式は单相流の基礎方程式に比べて極めて複雑であり、当初は解析的にはもちろんのこと数値的にも解くのは困難であると考えられていた。しかしながら、コンピュータの飛躍的発展と数値解析技術の進歩により、今日は気液二相流の数値シミュレーションも広く行われるようになり、1次元流についてはかなりの精度をもって予測することが可能となってきている。

近年、気液二相流を用いる様々な工業装置の高度化と高い安全性への要求から、気液二相流現象についてもより詳細で正確な知識が必要となり、実験と解析の両面において精力的に研究が行われるようになってきている。その中でも特に重要な課題として次のようなものが挙げられる（あくまで筆者の限られた知識の範囲での紹介であり、全ての重要課題を網羅しているものではない）。

まず、1番目の課題は、気液二相流の多次元挙動の解明である。原子炉やボイラー、熱交換器などのエネルギー機器、航空機、船舶、自動車などの輸送機器においては、蒸発器、凝縮器、気液分離器、燃焼器など複雑な構造物を持つ空間内や複雑に分岐する配管群内の気液二相流の挙動が重要となる。このような体系での気液二相流の挙動を正確に予測するためには、1次元流による近似では限界があり、2次元、3次元の取り扱いが不可欠となる。单相流の場合には、近年では直接解析による多次元解析が行われるようになってきている。しかしながら気液二相流においては、このような直接解析は事実上不可能であり、時間的、空間的に平均化された基礎方程式を用いて多次元解析を行う必要がある。この場合、気液二相流の多次元伝熱流動に関する様々な構成方程式が必要となり、構成方程式によって、気液二相

流の数値解析精度は大きく異なる。気液二相流の多次元解析は、多次元の基礎方程式を数値解析するというシミュレーション技術そのものについては現時点においても可能となっている。しかしながら、多次元の挙動に関する知見は実験データベース、モデリング共に現時点では極めて不十分であり、信頼性のある構成方程式が開発されていない。従って現状では気液二相流の多次元挙動の予測は十分な精度をもって行うには至っていない。中でも重要なものとして、気泡や液滴に働く抗力は揚力などについての多次元的な構成方程式、多次元的な乱流応力や乱流熱流束の構成方程式があるが現状では研究段階にあり十分確立された構成方程式は得られておらず、現象の解明とモデル化が重要な研究課題となっている。

2番目の課題は、1番目の課題とも関連しているが、気液二相流の乱流構造の解明である。気液二相流においては気液界面による乱流の生成や吸収が乱流現象に大きな影響を及ぼす。また固気、固液二相流に比べて、気泡や液滴、液膜の界面が大きく変形するため、これらによる乱流のソースタームは極めて複雑となる。気液二相流の乱流解析も单相流の乱流解析の手法を拡張して行われるようになってきており、数値解析そのものとしてはかなりの詳細解析を行うことは可能であるが、気液界面による乱流のソースタームの与え方によって結果が大きく異なるため、現状では、十分な予測を行うには至っていない。気液二相流の乱流の場合には单相流のような直接解析によるアプローチは事実上不可能であり、実験データの蓄積による現象論的なモデル化が重要な課題となっている。

3番目の課題は気液二相流と構造物との連成現象の解明である。これは、大型の高性能ボイラーや原子炉の安全性において特に重要な問題となっている。気液二相流の圧力変動（動圧、静圧）が、管群や管路内の障害物を振動させ、それによって、気液二相流の境界条件が変化するため、気液二相流の流れも変化し、ある条件の下では共鳴現象が起こって、大きな構造物の振動を引き起こし、疲労や破壊につながるものである。気液二相流の場合、様々な大きさの気泡、液滴、液膜および気液界面波が存在し、圧力振動の時間的、空間的スケールも広い範囲に亘るため、单相流に比べて、連成現象はより複雑となる。特に最近では、原子炉をはじめとする様々なエネル

ギー機器、流体機器の安全性、耐久性の問題が重要な課題となっているが、実験的にも解析的にもこの現象の解明は研究の端緒についたばかりであり、気液二相流の重要な研究課題となっている。

最後の課題としては、非常に狭隘な流路における気液二相流の挙動の解明がある。気液二相流においては気液界面に表面張力が働くため、流路のサイズが小さくなると、界面の曲率も小さくなり、流体力に比べて、表面張力の寄与が大きくなる。大気圧下の水-空気系では流路径が5 mm程度になると表面張力の影響が顕著になってくる。このような表面張力の影響が顕著となる流路における気液二相流の流動伝熱現象は当然の事ながら、通常の口径の管の気液二相流現象とは大きく異なったものとなる。特に最近では、電子機器冷却技術、マイクロマシン技術、バイオエンジニアリングに関連して、こうした狭隘流路の気液二相流現象の応用が広がりつつあり、その解明が強く求められている。こうした分野の研究も近年非常に盛んになってきているが、通常口径管の気液二相流に比べて知見は非常に不足している。この原因の一つとしては、狭隘流路における気液二相流の実験的計測が極めて難しく十分なデータが得られていない事があげられる。今後実験技術も含めた研究が重要な課題となっている。

こうした工学としての研究面での課題とは別に、気泡や液滴に関連した気液二相流の現象には多くの興味深い話題や課題が存在する。「水滴岩を穿つ」あるいは「水滴石を穿つ」という言葉がある。これは軒下から滴り落ちる雨だれがその下の石の上に長い年月滴りおちると、石に孔があく現象を指し、身近に観察されるものである。ではなぜ孔があくのか。これについては実に様々な説明がなされている。一つは化学的なもので水が非常にわずかであるが石の成分を溶かしこれが長い年月続くと石に孔があくという説明である。しかしどうして水滴のあたる所だけが溶けるのかが納得できない。もう一つの説は、物理的なもので、水滴が石にあたる際の運動エネルギーによるとする説である。しかしながら、水滴が空気中を落下する速度はせいぜい数 m/s であ

りその運動エネルギーは石に孔をあけるにはとても足りない。

私は、水滴によって石に孔が開くのは、水滴が固体の表面にあたる際の衝撃力であると考えている。水滴が固体に衝突する現象を解析すると、運動エネルギーによる圧力の数千倍の衝撃力 F が瞬時であるが働く。式で書くと

$$F \approx \rho u_d u_s$$

となる。ここで ρ は水の密度、 u_d は水滴の速度、 u_s は水中の音速である。水滴の速度そのものは数 m/s 程度であるが、水中の音速は 1500 m/s 程度であるので水滴が固体壁に与える力は非常に大きくなる。これは、水撃とよばれ配管の中で蒸気が凝縮する際にも見られる現象で、丈夫な金属配管を破壊するほどの衝撃力が発生する。水滴が石の上に落ちる際にも極めて短時間であるが、水撃が働き石の分子が僅かにはがれる。これが長い年月続けられることによって、石に孔があく可能性は十分にある。すでにこのような説明がなされていて私が不勉強で知らないだけかもしれない。

このことは勿論仮説であり、証明されたわけではない。またもっと厳密な解析や検証が必要であろう。また他の説もそれぞれ説得力があり、結局のところなぜ石にあくのかは解らない。しかしながら、私の研究してきた気泡や液滴に絡めてこのようなことを考えることは非常に楽しいことである。また、この現象が私たちの身近で水と空気と石というありふれた物質の組み合わせで起こるにもかかわらず、未知の部分があることが更に面白い。

このように私自身も気泡や液滴と半世紀近く付き合い気液二相流の研究に携わってきたが、まだまだ解らないことだらけで、数多くの重要で未解明の課題が残されている。しかしながら、近年のコンピュータと数値シミュレーションのめざましい発展、また、レーザーや可視化技術など最先端の測定技術の著しい進歩によって、こうした課題が解決されていくものと確信している。今後の若い研究者の活躍に大いに期待している。また私自身も「水滴岩を穿つ」心づもりで研究を続けたいと思っている。