

二相流の研究が始められた頃のこと

神戸大学工学部機械工学科 赤川 浩 爾

最近では二相流に関する論文の数が非常に多くなっているの、新しく二相流の研究を始めようとする若い人達、あるいは研究を始めたばかりの人達は、これらの全てを読み、理解し、さらに新しいものをつくり出すことは大変困難なことと感じておられるであろう。筆者は日頃から卒業研究の学生に接しているの、研究を始める時に学生諸君が二相流に対して（さらに一般的には何のテーマであってもよいが）持っている感じもかなりわかっているつもりである。つまり、二相流として確立された大規模の学問的体系があり、その中のどの部分も理論的にも実験的にも難かしいものであって、何となくわけのわからぬままに与えられたテーマの一端に取りついていると言った印象である。

そこでここでは「二相流」と言う名前もなく全く新しく「気体と液体の混合物の流動」の研究が始められた頃のことを書いてみよう。私自身は回顧談を書くほどの年寄ではないし、また過去の思い出を書くことにためらいを感じるのではあるが、短い二相流の研究の歴史の中で、最初から関係した者として、その出発点のことを一言残しておきたい気持もある。本文の中で何を感じられるかは読者の自由であるが、筆者としては如何なる学問の出発点もきわめて単純なものであり、また一見して完成された近より難いような技術も、その最初はきわめて小規模の実験から始められたものであることを示しておきたい。この事に関連して、話はやや飛躍するが、スミソニアン博物館で実物大の宇宙ロケットと共に展示されていたゴダード教授の最初のロケットの実験装置（直径7~8cm、長さ30cm程度を見た時の感概を思い出す。それは我々の実験）室にでもころがっていきそうなさびた鉄パイプの加工品としか見えないものであり、その

ような基礎から現在の巨大な技術が生み出されて行った開発の歴史の重みをひしひしと感じたからである（ただしゴダード教授の技術はドイツを源流とするロケット技術には直接にはつながっていないのであるが）。話を元にもどしてささやかであるが、二相流の研究が始められた頃のことを述べよう。

(1) **二相流の最初の実験：**昭和23年にある機縁で大阪大学工学部の機械工学科、久武教授の研究室（蒸気原動機の講座）にプライベートな形で出入させてもらえることになり、そこで川崎重工から就任されたばかりの石谷清幹助教授（現在の機械工学科教授）の御指導を受けることになった。当時は敗戦の苦しさが極度に現われて研究費も設備もない状況の下で、ボイラに関係する研究で、金がかからず、またすぐに着手できるものとして、水と空気を使う実験が考えられた。それが気液二相流の研究の始まりである。実験装置は直径2インチのガス管にポンプより水を流し、また戦災をまぬがれて残っていたコンプレッサーからの空気を混入するだけの簡単なもので、そのテスト管の途中に挿入されたオリフィスおよびノズルにおける差圧が水銀マンオメータで測定された。この実験は化学機械協会（今日の化学工学協会）の講演会で発表されたが、後に「化学機械、第14巻、6号、昭和25年、278ページ」にのせた報告によるとその目的は『ボイラ蒸発管内の飽和水および飽和蒸気の流動状態および循環比は外部より直接に知ることはできない。このような場合の流動の性質、各々の流量を知ることが負荷の変動する蒸気缶においては望ましい。本研究はこれらの問題に対する予備的研究として気水混合物の流動の性質を調べることを目的とした』と書かれている。このように23年前の書かれた目的は

『蒸気缶』を「原子炉およびボイラ」と書き換えればそのまま現在でも通用するものであって二相流の最初の研究は蒸発管中の流動現象の解明を目的とするものであった。

単相流の流量測定は一個のオリフィスあるいはノズルの差圧の測定値からなされる（一個の未知数に対して一個の測定値から決定される）、一方、二相流の気体流量、液体流量の2個の未知量に対しては一個の差圧の測定値からは決定できない、そこで同一開口比のオリフィスおよびノズルの2個の差圧測定値から2個の未知量が決定できると考えられた。このような意図の下で実験が行なわれた。上記の報告によると

『混合物の流動する場合の差圧特性はオリフィスとノズルは明らかに異っている。水量、空気量を座標軸とし差圧をパラメータとする同一開口比のオリフィス、ノズルの図を作製すると両曲線は交わる。従って逆に両者により差圧を測定すれば各々の差圧曲線の交点より水量、空気量を知ることができる。このような方法により気水混合物の各々の量の計測が可能であることを明らかにすることができた』となっている。当時の卒業研究の学生の大政氏（現在、タクマ）花婿氏（大阪ガス）との共同でなされた実験結果は、実は上記の表現のようなすっきりとしたものではなかった。すなわちある流量範囲ではマノメータの読みが大きく変動するのであり、その振動が正弦波状にでもあるならばまだしもある範囲内で正弦波状に振動しているかと思うと、急に大きく変り、またその付近で振動するような性質のものであった。この変動差圧に対して何とか強引に平均値を読みとって結果を出したのであるが、平均値のとり方について三人で盛んな議論をしたおぼえがある。差圧の変動幅が差圧の平均値よりもはるかに大きい場合に“とに角、測った”と言うような平均値に意味があったかどうかは問題ではあるが、最初の研究はそのようなものであった。その後二三の人から二相流の実験を始めて見たが、脈動が大きくて測定できないので中止したと言う話を聞いた事がある。

この当時には二相流は静的にのみ考えられて

いて、脈動は測定に対して不具合なものとしか考えられていなかった。しかしそれから約10年を経過した後では、差圧変動自体が二相流の特性であるとの観点が石谷らにより明らかにされて、昭和35年の世古口氏（現在九州大学教授）の学位論文では変動値自体が論議されているしまた昭和39年の機械学会論文集30—219ではオリフィスの平均差圧と変動中の二つの値から気液流量を求める方法が示されている。さらに昭和45年には筆者らによって管内の差圧変動を統計的に取り扱った研究（機械学会論文集、36—289）なども発表されている。すなわち同一現象も時代とともに新しい見方により、また最初の頃には考えられなかった統計的現象としての処理がなされるように変化して来たのである。

前記の昭和25年の「化学機械」の中の半頁ばかりの報文が二相流の最初の印刷物としての報告であるので、我が国における二相流の研究の歴史はわずか23年の短いものである。

(2) 二相流を目で見ること： 上記の最初の実験装置の気液混合部の上に短いガラス管が接続されていて、この部分での流動状況の観察では何となく白い部分と黒い部分が交互に流れるように思われただけで、特に流動様相については注意をはらっていなかった。ところで昭和25年9月の東京の機械学会講演会で東大の西脇教授の研究室の講演で、今日で言う Taylor Bubble の説明がなされた。この場合にはたしか水は流動せず、管の下端から空気のみが吹き込まれる実験であったようである。流れの厳密な観測を行なっていなかった私達にとっては、この発表のような規則正しいスラグ流れの存在は意外であって、早速実験室の見学をさせていただいた。階段の下の三角形のせまい空間におかれた極めて小さな実験装置にまず驚かされ、またミニ圧縮機によるポンポンと言う軽快な音によって送り込まれた空気が見事な Taylor Bubble となって上昇していく事に再度驚かされた。

阪大に帰って早速にガラス管による実験装置の計画にかかった。当時は耐圧の太いガラス管の入手が困難であり、また装置が出来上ってもガラス管と鋼管の接続部で翌日になるとクラッ

クが発生していることが多く苦勞させられた。装置が出来上って最初に空気と水を流し始めた所、管中を小さな多数の気泡がキラキラと輝きながら流れ出した。水流量を変化させるとそれに応じて気泡が速く、またおそく流れ、気泡の輝きは私にとっては宝石のように感じられた。うれしくて早速研究室の石谷先生を呼びに行ったものである。これが今日で言う気泡流を見た最初である。空気量の増大とともに西脇研究室で見たスラグ流に遷移して行く状況が観察されこの実験で気泡流とスラグ流の流動様式と遷移が明らかになった。この装置も極めて簡単なものでボイド率の測定は急閉法によったが、弁は水側の入口のみにあり、かけ声とともに水側の弁を締めるのと同時に他の人が空気導管のゴムチューブを指でつまんで空気を止めるというような原始的な方法をとった。この時に写した気泡流とスラグ流の写真は現在の時点で見ても見事なものであったが、論文の内容自体は幼稚であった。これは昭和27年の機械学会論文集18巻72号に発表されており、これが機械学会にのった最初の二相流の論文である。一方、「化学機械」誌上では昭和26年に東工大の矢木教授らによる主として環状二相流の実験解析の優れた論文が発表されて、私のように研究生活を始めたばかりの者にとっては、そこで用いられていた実験結果の処理の手法のあざやかさ（現在で見ればしごく当然の方法であるかも知れないが）に教えられることが多かった。しかし一方、機械学会論文集にのせた私の幼稚な論文もある効果？を持ったようであり、後にある大学の高名な先生とお話をした時に、『自分の研究室でも二相流の実験を考えていたが、貴方の所の発表を見たので取り止めた』との事であった。このおかげで当分の間は二相流の研究に関しては機械学会関係で独走に近い形であった。このことに関連して二つの事を感じている。その一つは当時誰もが二相流の研究の大きな発展を予期していなかった事であり、他の一つはその後の種々の経験からも感じた事であるが、他の研究室で取り上げられたテーマであっても、必ずしもそれをさける必要はなく、各人によって対象に

対する考え方、処理方法も異なるので、広く発展させるためには並列の研究も望ましいものであることである。

(3) 本格的な二相流の実験装置： 大阪大学での研究に平行して、筆者の属する神戸大学で実験装置の作製にかかったのは昭和28年頃からである。研究費がなかったので、購入品は1万円のポンプ1台のみで、1/2", 1", 2"のテスト用のガス管は川崎重工からいただき空気圧縮機は他学科所属のものをお借り下され取りこみ、他はドラム缶を利用して、二相流の実験装置を組立てた。管径は3種類、管の傾斜角は水平から垂直までとし、ボイド率、摩擦損失、流動様式を系統的に実験する事とした。ボイド率の測定は入口弁、出口弁の急閉法により、差圧は水銀マンオメータによるだけの極めて簡単なものであった。卒業研究の学生諸君の協力により精力的に実験データを出すと共に、私自身は「ボイラ水循環の計算法」の理論の確立に努めた。その理論の中で必要な数値としてボイド率、摩擦損失などを位置づけて行った。そして大気圧下の空気-水系の実験値から高圧下の飽和蒸気-飽和水二相流と対する数値への拡張をはかった。

(勿論、後者の値は実験により求められるはずであるが、高価な実験装置を必要とするので、実現することは不可能であったから)。この実験を基にして学位論文としてまとめた「ボイラの水循環に関する研究」(昭和33年)中では「流動様式」、「ボイド率」、「摩擦損失」の各項が記述されていて、一応、今日の二相流の体系の原形は出来ている。

この研究はボイラの水循環が主題であって、二相流の研究はその構成要素にすぎないものとしたしか私は考えていなかった。この頃には石谷先生から将来のテーマとして「二相流」を取り上げることをすすめられたが特にそれを専攻する程の気持もなかった。実際の所は、私の頭の中には「ボイラの水循環」、「強制貫流ボイラの諸問題」などがあって、二相流の研究の大部分は当時続行中の実験で終わってしまっているような気持があったのである。流動状態の複雑さを実際に観察していたために、それを理想化した

ような単純なモデルで現象を理論解析するような気持ちを持ち合わせていなかった。現時点から見るとそのような見通しのなかったことははずかしい限りであるが、実際に原子炉の発展に伴う気液二相流の流動、伝熱の細部にわたる研究の必要性を十分に認識していなかったのである。

(4) 二相流研究の新局面の展開： 上記のような初期の研究はボイド率、圧力損失などの値の巨視的な整理に終わっていたものであった。このような現象面をのみ追う立場からなされていた研究は、次に昭和32年頃から二相流の本質的解明へと急な展開を見せたのである。それは石谷先生の指導の下に世古口氏によりなされた。昭和35年の同氏学位論文「気液二相流に関する研究」では『従来の理論は……多分に現象的で、二相流の本質的な解明にはほど遠いものであった。すなわち、圧力損失と気体体積率および流動様式は実験結果によれば互いに密接な関係を持つものであるのに、従来の理論ではこれらが独立に取扱われ、両者間の関係をも与えるような統一的な理論は従来発表されていない』とあって、統一的に解明するために二相流のエネルギー式を基礎として、二相流の大きな静圧変動で表わされる乱れのエネルギー損失を含んだ理論が立てられた。ボイドはエネルギー式で散逸エネルギーが最小であるという条件から決

定されるとして、圧力損失とボイド率が統一的に結合されている。

この研究結果が一般にどのような評価を受けたかと言う事は別にして、筆者にとっては研究の展開の仕方に目を開かれたような思いを持った。これによって、一つの立場でのみ事物を見て、それが全体であるかのように思っていることも新しい観点に立って見ればさらに深く追求すべきものであり、またその発展も期待できるものであることを痛感させられたのである。そのように考えると、この世古口氏の示して見せた二相流の本質も、さらに別の立場からさらに発展的に見られる可能性があることになるので、さらに研究すべき事の多くまた深いことをおぼえたのである。

むすび： 二相流の実質的な研究が開始されてから二十数年を経て、最近になって二相流に関して5冊の著書が相次いで発行された。これによって二相流の学問体系が一応出来上っているように見られる。これらを見るとすべてが最初から完成された形で作くり出されたような感じを受けられるが、このような形に到るまでは多くの表面に出なかった研究がなされている。ここでは我が国においてこの発展の一隅にあって著者が初期に経験し、感じたことの一部を書いた。これが何かの御参考にでもなれば幸いである。

以上