気液二相流研究史と関連技術* —気液二相流研究史の私感—(第12報)

A History of Gas-Liquid Two-Phase Flow Research and the Related Technology (12th Report)

赤 川 浩 爾**
AKAGAWA Koji

Abstract The progress of the two-phase flow research has been divided into four stages in this series of the report. These periods are (I) 1948-1959, (II) 1960-1970, (III) 1971-1979, (IV) 1980-1988. In Chap.8 in this report, various methods of the theoretical analysis of water circulation in boilers in the time before the period (I), when analog and digital computers did not exist, have been introduced. And short review of development of theoretical analysis of flow instabilities in two-phase flow in the periods (II)-(IV) has been described based on the history of publication of books, reviews, and dissertations concerning two-phase flow, as the introduction of Chap.9. The main parts of Chap.9 will be presented in the next report.

Keyword : Gas-Liquid Two-Phase Flow, Flow Instability, Flow Oscillation, Analytical Method, History

8. 気液二相流の前史期、第1期(1922～1959)における解析手法

8. 1 まえがき

第11報(Vol.14, No.2, 2000)のTable 7.1によって解説したように、コンピュータの急速な発展によって、気液二相流流動不安定の解析方法が進歩し、変遷してきた。これと並行して気液二相流の基礎式、あるいはモデルについて理論的に厳密な考察がなされて、7.2で紹介したように各種の解析手法(例えば、等速均質流モデル、スリップ流モデル、ドリフトフラックスモデル、二流体モデルなど)が開発されてきた。これらの各手法は現在では、混相流の専門書、解説などで一般化された形で表示されていて、体系化されている。したがって対象とする現象に対してこれらの基礎式を用いてコ

ンピュータで直ちに解を求めることが一般化してきている。しかし現象の本質に迫るためには、その物理的解釈が重要であるので、さらなる考察が必要である。

上記の解析モデル、基礎式の発展過程、変遷にはかなり長い歴史がある。たとえば古く70年も前の前史期の解析手法は現時点においても極めて優れたものであり、工学的あるいは技術的研究に対する思考法として学ぶべき点が多いように思われる。そこで各年代(本研究史の時期分類)において、気液二相流を含む装置中の流動現象に関して(主として流動不安定現象を対象とする)解析手法の変遷を解説することにする。これによって気液二相流の基礎式(解析モデル、手法)に対しての研究史の各時期における工学者、技術者の思考方法の変遷

* 2001.4.18 受付

** 神戸大学名誉教授

〒662-0067 西宮市深谷町6-22 TEL(0798)72-3102 FAX(0798)72-3102

がみられる。またコンピュータの普及による解析手法への影響と変遷が明らかになる。このことは気液二相流の解析の問題に限らず、一般的に工学、技術における解析手法の発展の典型的なパターンと考えられる。

8. 2 創世期(本研究史の前史期)における気液二相流の解析手法

8. 2. 1 1924年の宮城による気泡ポンプの解析手法

1942年の宮城(当時、東北大学の教授であり、機械工学全般にわたり著名であった)による気泡ポンプの解析[274]が、著者の知る限りでは気液二相流の基礎式として文献に出ている最初のものである。気液二相流(二相流という名称はまだ無くて混合物と名付けられていた)の基礎式として、次式が解析の基礎とされている(ただし原文は工学単位であり、記号は現在のものに変更して示す)。

$$dz + (1/\rho g) dp + (\lambda/d_e)(u_l^2/2g) dz = 0 \quad (8-1)$$

この式は単相流における周知の運動方程式の形をしているが、この中の密度 ρ は気液混合物の平均密度、速度 u_l は液の速度と定義されている。その理由として「水の比重は空気に対して大きいから空気-水混合物のエネルギーを水のみのものにかぎることにする」と明記されている。またこの研究段階においてすでに気泡の「相対速度」 u_r が考慮されている。ここで二相流の平均密度 ρ は式(8-2)で定義されていて、 u_r は考慮されていない。一方、水の速度 u_l は式(8-3)のように相対速度が考慮された値として定められている。

$$\rho = (Q_l \rho_l + Q_g \rho_g) / (Q_l + Q_g) = Q_l / (Q_l + Q_g) \quad (8-2)$$

$$u_l = \{(Q_l + Q_g) / A\} - u_r = (u_{l0} + u_{g0}) - u_r \quad (8-3)$$

ここで Q_l 、 Q_g は液相と気相の容積流量[m³/s]、 A は流路の断面積[m²]である。なお相対速度 u_r についてはすでに1924年当時から「静止液体中の気泡の上昇速度の値は気泡の大きさがある程度以上では一定であることが実験により明らかにされていて」(1921年の宮城の実験[275]による)、この値は「流動中の場合にもほぼ成立する」と仮定されている。また気液二相流の摩擦係数 λ については特に記述されていないが、0.006~0.009の値が計算

に用いられている。

この気泡ポンプとは、水中に挿入されて上端は水面より上方にあるような上昇管の下端から空気を挿入することにより、気水の混合物を管の上部より送り出す(すなわち水を高いところに汲み上げる)ような原理のポンプである。この上昇管の管長 H について式(8-1)を積分することで、挿入する空気流量 Q_g と送水量 Q_l の関係式(8-4)が得られている(式の誘導などの詳細は省略する)。

$$H = \left[\frac{p_a}{\rho_l} \left(\frac{p_e}{p_a} - 1 \right) + \frac{p_a Q_g}{\rho_l Q_l} \log \frac{p_0}{p_a} - \frac{Q_g / Q_l - A u_r}{g A^2} \left(1 - \frac{p_a}{p_0} \right) - \frac{Q_g^2}{2g A^2} \left\{ 1 - \left(\frac{p_a}{p_0} \right)^2 \right\} \right] \div \left[1 + \frac{\lambda}{2G d_e A^2} \left\{ (Q_l - A u_r)^2 + \frac{2Q_g(Q_l - A u_r)}{(p_0/p_a) - 1} \times \log(p_0/p_a) - (p_a/p_0) Q_g^2 \right\} \right] \quad (8-4)$$

ここで、 p_a は大気圧、 p_0 は上昇管の入口圧力である。 $(p_0 - p_a) = H_l \rho_l g$ であるので、式(4)中の p_0/p_a は上昇管下端の水面からの距離 H_l を代表していることになる。したがってこの式から H 、 H_l 、 Q_g 、 Q_l の関係すなわち気泡ポンプの性能が一般化されて表されているのである。原論文では実用的な見地からの計算例が示されている。このように現在から77年も以前に気液二相流の基礎式として均質スリップ流モデル(第11報の7. 2)に基づく工学的な解析が宮城により行われているのである。

8. 2. 2 Münzingerによる水循環の解析

蒸発管系における気液二相流の流動に関する理論として最初にまとめられたものは、1922年のMünzingerの著書“Die Leistungssteigerung vom Grossdampfkesseln”(大型ボイラの出力増加)[18]において、ボイラの水循環の計算法と計算例が詳細に論議されている。水循環の基礎式として式(8-5)が第一に書かれている。すなわち基礎式の運動方程式は式(8-1)のような微分形ではなくて、循環回路に渡って積分された形の式がまず示されているのである。

$$h_f - h_s = (\Delta h_{di} + \Delta h_{dic} + \Delta h_{df}) + (\Delta h_{si} + \Delta h_{sic} + \Delta h_{sa} + \Delta h_{sf} + \Delta h_{s0}) \quad [m] \quad (8-5)$$

ここで、 h_f : 降水管下端の静圧の水頭 $= (\rho_l / \rho)$
 L 、 h_s : 蒸発管下端の静圧で次式で表される水頭である。

$$h_s = (1/\rho_0 g) \int \rho g dl$$

Δh_{di} : 降水管入口の流動損失、 Δh_{dic} : 降水管入口の加速損失、 Δh_{df} : 降水管中の摩擦損失、 Δh_{si} : 蒸発管入口加速損失、 Δh_{sic} : 蒸発管入り口の流動損失、 Δh_{sa} : 蒸発管中の加速損失、 Δh_{sf} : 蒸発管中の摩擦損失、 Δh_{se} : 蒸発管出口損失。

したがって、式(8-5)は物理的な解釈として次のように表現されるものである。

$$Lg \{ \rho_l - (1/L) \int \rho_m dl \} =$$

(降水管中の流動抵抗)+(蒸発管中の流動抵抗)

(8-6)

左辺は降水管と蒸発管中の流体の密度差による循環の駆動力、右辺は循環回路の全流動抵抗である。すなわち蒸発管系の水循環の基礎式がこの1900年代初頭には明確にされているのである。右辺の流動損失の各項の値が原本ではその当時の資料に基づいて詳細に論議されており、直ちに設計に利用できるような技術書になっている。

ここで蒸発管中の気液混合物の速度と密度に関しては、「気泡と水は蒸発管中で同一速度である」と明瞭に仮定されている。すなわち現在の均質等速流モデルと同じである。また蒸発管中の摩擦損失 Δh_{sf} については次式のように表されている。

$$\Delta h_{sf} = (\lambda/2gd) \int (u_m \rho_m)^2 (1/\rho_m) dl$$

$$= (\lambda/2gd) L \rho_l \{ (u_{me} - u_i) u_i / 2 + u_i^2 \}$$

(8-7)

すなわち気液混合物の摩擦係数 λ を一定と仮定し、また上式の積分では入口流速 u_i と出口の混合物の平均流速 u_{me} により近似されている。

当時のボイラの諸元は、蒸発管の熱負荷 $\dot{Q} \sim 400 \times 10^3 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$ 、 $L = 6 \text{ m}$ 、 $d = 0.005 \sim 0.1 \text{ m}$ 、圧力は最高で2 MPa程度であり、これに対する代表的な理論計算の結果では、 $u_i = 1.4 \sim 2.2 \text{ m/s}$ 、 $u_{me} = 4 \sim 16 \text{ m/s}$ 、出口ボイド率 $= 0.6 \sim 0.9$ のような値が示されている。このような実用ボイラと同規模のテストボイラあるいは実用ボイラについての水循環の詳細な検討が行われていて、ドイツの工業技術の基盤の深さと工学の緻密さがこの本によっても分かるのである。

8. 2. 3 Schutesの水循環解析の手法と結果

1929年にはドイツでは、水循環に関するSchul-tesの学位論文「立型水管式ボイラの水循環」[276]

が発表されている。その解析では、次の微分形の運動方程式が出发点とされている。

$$dp + d(u_l^2/2) \rho_m + \rho_m g dz +$$

$$(\lambda/d) (u_l^2 \rho_m/2) dl = 0 \quad (8-8)$$

(原論文では工学単位系で記号は異なるが、理解しやすくするために現在広く用いられている表示に改めてある)。ここで ρ_m は気液二相流の平均密度(Das mittlere specific Gewicht des Dampfwas-sergemisches)と定義され、現在と同じ次式で表されている。

$$\rho_m = \alpha_1 \rho_l + (1 - \alpha_1) \rho_g \quad (8-9)$$

α_1 は液相が流路断面積で占める割合であり、これは現在用いられているボイド率 α で表すと、 $\alpha_1 = 1 - \alpha$ である。また流速としては、連続式から次式の液の流速 u_l が用いられている。

$$u_l = \{ Q_g / (1 - \alpha_1) \} - u_r \quad (8-10)$$

ここで相対速度 u_r の値として、当時すでに得られていた多くの実験値が記載されている。また気液二相流の摩擦損失については式(8-8)の第4項の表示がなされていて、摩擦係数 λ の値として当時の周知の単相流の値が用いられている。

以上のように、70年以上も前から現在の均質スリップ流モデルに対応するモデルにより、ドイツの工学者は解析を行っていたのである。上記の基礎式に基づいて、式(8-8)の管長方向の積分により上下ドラム間の圧力差($p_2 - p_1$)が次式で表されている(ただし一様加熱、相対速度 u_r は一定で仮定されている)。

$$p_2 - p_1 = \rho_l g z - K \left\{ \phi - \phi_l \ln \phi - \frac{u_r}{\rho_g} \frac{\phi_1}{\phi} + \frac{u_r}{\rho_g} \frac{\phi_1^2}{2\phi^2} \right\} \phi_1^2$$

$$+ M \phi_1 \left\{ \frac{\phi_1^2}{2} + \frac{2u_r}{\rho_l} \phi + u_r \left(\frac{u_r}{\rho_l^2} + \frac{\phi_1}{\rho_g} \right) \ln \phi \right.$$

$$\left. - \frac{2u_r^2}{\rho_l \rho_g} \frac{\phi_1}{\phi} - \frac{u_r^3}{\rho_l^2 \rho_g} \frac{\phi_1}{2\phi^2} \right\} \phi_1^2 + \frac{\rho_l}{2} (u_{e2}^2 - u_l^2)$$

$$- N \left\{ \frac{\phi^2}{2} + \left(\frac{u_r}{\rho_l} - \phi \right) \phi \ln \phi \right\} \phi_1^2 + (1 + \zeta) \frac{u_l^2}{2} \rho_l$$

(8-11)

ここで

Fig. 8. 1 Calculated inlet velocities in evaporator tubes and down-comer in Humboldt - Model boiler (Schultes) [276].
(実験用ボイラにおける上昇管と降水管の入口速度の計算値)

$$K = L \sin \theta / [(G_{ge} / \rho_l) \{ (1 / \rho_g) - (1 / \rho_l) \}^2]$$

$$M = L \lambda / [(Q_{ge} / \rho_l) 2 g d \{ (1 / \rho_g) - (1 / \rho_l) \}^4]$$

$$N = (\rho_l / g) \{ (1 / \rho_g) - (1 / \rho_l) \}^2$$

$$\Phi = u_{lx} \{ (1 / \rho_g) - (1 / \rho_l) \} - (u_i / \rho_l) \quad (8-12)$$

G_{ge} : 蒸発管出口の蒸気の質量流束, u_i : 入口流速, u_{le} : 出口における水の速度である。この蒸発管と降水管中の流動の式の組み合わせから、水循環の計算が可能となる(それについては省略)。ここでは誘導された式が複雑な形をしていることのみを紹介しておく。この式にみられるように一応は解析的な式の形で表されていて、各種の型式のボイラに対して各種の条件の下で水循環計算がなされて、多くの図によって水循環におよぼす各種因子の影響が明らかにされている。例えばFig. 8. 1はその一例であり、実験用ボイラ“Humboldt-kessel-Model”における全蒸発量と各並列上昇管と降水管中の循環速度の計算値が示されている。

当時はボイラの高出力化が進められた時期にあり、高圧、大容量のボイラ開発のために水循環による安全性の確保の必要性の背景があったのであり、これらのMünzinger, Schultesらの著書、論文においては、丹念にデータを積み上げて、緻密で重厚なドイツの工学(技術)の手法と進んだ技術開発の一端が見られる。

8.2.4 久武による水循環の解析

我が国におけるボイラの水循環の最初のもと

た論文は、1939年の久武真直(当時、大阪大学、機械工学科教授)によるものである。その論文[277]によると気液混合物(気液二相流)の管中流動の基礎式は次の微分形の運動方程式である。

$$dp + \rho u du + (\lambda / d) (\rho u / 2) u dx + d (\zeta u^2 / 2) \rho - \sin \theta \rho g dx = 0 \quad (8-13)$$

蒸発管の入り口、出口間の圧力差($p_1 - p_2$)は上式の積分より

$$p_1 - p_2 = \rho u (u_e - u_i) + (\lambda / d) (\rho u / 2) \int u dx + \sin \theta \int \rho g dx \quad (8-14)$$

ここで速度 u としては気液間の相対速度を無視して、液の速度 u_l と蒸気の数値 u_g は等しい、すなわち

$$u = u_l = u_g$$

と置かれている。しかしこの仮定は無条件に置かれているのではなく、原論文では次のような根拠が明瞭に書かれている。

「管内で発生する気泡は直径が比較的小さく、かつ発生と同時に伝熱面を離れて上昇する。実験によれば気泡は離脱後、直ちに定速度となり水中を上昇する。しかも気泡の直径が相当小さい場合には缶水の循環速度に対し近似的にこれを無視することができる」。

また密度 ρ (蒸発管入口から x の距離における気液混合物)としては、管長に沿う一様加熱の仮定の下に式(8-15)で表されている。

$$\rho = G / \{ \{ G - G_{g0} (x / L) \} (1 / \rho_l) + (G_{g0} x / L) (1 / \rho_g) \} \quad (8-15)$$

$$= G / (G_{lx} + G_{gx}) \quad (8-15')$$

ここで G は蒸発管1本当たりの循環流量[kg/h]、 G_{g0} は1本当たりの蒸発量[kg/h]、 L は蒸発管長である。この式を書き改めると式(8-15')で表され、相対速度を考慮しない等速均質流モデルであることが分かる。ここで Q_{lx} 、 Q_{gx} は x 点における液体、気体の容積流量である。また気液混合物の摩擦係数に対しては単相流における粗面の値が用いられている。

この蒸発管の運動方程式と降水管の運動方程式から水循環の関係式が得られて、それによって循

環速度(降水発管入口速度) u_{f0} は次式のような解析解の形で求められている。

$$u_{f0} = \sqrt{2gH} \sqrt{\ln(1 + N \frac{q'}{n'}) - \frac{q'}{n'} \ln \frac{1 + N + N \frac{q'}{n'}}{1 + q'/n'}} \\ \div \left\{ N \frac{n'}{q'} \left(N \left(\frac{q'}{n'} + \frac{1}{n'^2} \right) + \left(2\zeta + \lambda \frac{L}{d} \right) \right. \right. \\ \left. \left. \times \left\{ 1 + \frac{N}{2} \frac{q'}{n'} + \frac{1}{n'^2} \left(1 + \frac{N}{2} + N \frac{q'}{n'} \right) \right\} \right\} \right\} \quad (8-16)$$

$$N = \{ (\rho_l / \rho_g) - 1 \} (G_d / G), \\ n' = n_s / n_f, q' = q_f / q_s \quad (8-17)$$

ここで、 n_s 、 n_f はそれぞれ蒸発管、降水管の本数、 q_s 、 q_f はそれぞれの伝熱面負荷[kg/m²h]である。当時はセクショナルボイラなどが用いられていたため降水管の加熱も考慮されている。

このように循環速度は解析的な解の形で表されているが、式の右辺には N すなわち循環流量 G (これは u_{f0} と等価である)が含まれているので、解を求めるためには何らかの数値計算法によらねばならない。コンピュータの無かった当時においては、この数値計算に多くの労力を必要としたのである。この論文では多くの計算によって循環特性(循環速度に及ぼす各因子の影響)が示されている。例えばFig. 8. 2、Fig. 8. 3はその一例であり、前者は蒸発管と降水管の本数比 n' をパラメータとして蒸発量と循環速度の関係が示されている。またFig. 8. 3は蒸発管と降水管の加熱量比をパラメータとして加熱量に対する循環速度の特性が示されている。これによると加熱量の増加とともに循環速度が増加して極大値をとり、続いて減少する傾向が明示されていて、後年の原子炉内の循環特性の代表的な研究のFig. 6. 44(第8報)と同じものが、この1922年にすでに明らかにされていたのである。またFig. 8. 4は循環速度に及ぼす各種の因子；管長 l 、熱負荷 q 、圧力 p 、本数比 n' 、管内径 d 、及び管の傾斜角 θ の影響が示されている。なお当時の低圧のボイラでは自己蒸発(上昇管中を飽和液体が上昇するにつれて圧力が低下するので、外部から加熱しなくても蒸発すること)の影響についても解析されている。この論文によってこの1939年の時点でボイラの水循環特性が広く説明されている

のである。

上記の8. 2. 1～8. 2. 4の研究の手法は、一応は解析解の形の式を誘導し、それにより各関係因子の影響の形態を解釈することを可能にしている。ただし、解の式は所要の未知数に対して陽ではなく、右辺にも未知数が含まれているので、数値的な解はトライアンドエラーの方式で数値解法により求めることになる。コンピュータの無かつ

Fig. 8. 2 Calculated inlet velocity in downcomer (Hisatake) [278]. (降水管入口速度の計算値—本数の影響、(久武))

Fig. 8. 3 Calculated inlet velocity in downcomer (Hisatake) [278]. (降水管入口速度の計算値—加熱量の影響、(久武))

Fig. 8. 4 Calculated inlet velocity in downcomer (Hisatake) [278].
(降水管入口速度の計算値—各因子の影響、(久武))

たこの時代にはこの数値解を求めるために多大の労力と時間を要したのである。研究の要点は解析解に近くて、しかも物理的意味を明瞭にした形の式を求めることにあったと云える。

久武の論文についての私史

この久武教授の論文に関して、後年、気液二相流と水循環の研究を行ってきた筆者との因縁についてここで述べさせていただきたい。大阪大学の機械工学科の久武先生はまた神戸経済大学(神戸大学)の兼任教授(戦前からのIBMの統計機械を保有した経営機械化研究所に関連して)であった。筆者は昭和21年に大学卒業と同時にこの大学の教官になったので、形式的には久武先生は筆者の上司であった。このような関係で昭和23年(1948年)から筆者は大阪大学の久武研究室でプライベートな形で研究指導が受けられるようになった。しかし中堅教授としてご多忙な先生とは殆どお会いする事が出来ず、同研究室に助教授として赴任されたばかりの石谷清幹先生にお世話になっていた。ところでもなく久武先生が急逝されて、ついに専門分野のご指導を受けることが出来なかった。

その後、1950年ごろから石谷先生のご指導で気液二相流、ボイラの水循環の研究を始めた。この時になって始めて久武先生のこの1939年の水循環の論文の存在を知ったのである。この時点でも論文発表から10年を経過していた。この論文は約60年後の現在の視点でも解析手法の明確さ、結論の

明確さと実用技術への適応の面で極めて優れていて、教えられる所が多い。しかし発表された専門誌が「機械と電気」であって、学会誌あるいは論文集ではなかったのも、あまり一般的に知られることもなく、また他の関係論文でも引用も見られない。今回、筆者がこの論文の有用性を紹介することを喜ばしく感じている次第である。また久武研究室では1940年代の始めに空気—水二相流の実験が計画されて、一部実験装置が作製されていたようである。装置を作製した旧い職人さんから直接聞いたことであるが、先生の没後のことであり、それ以上は不明であり、研究目的と対象を知ることが出来ないことは残念である。もしこの実験が行われていれば、我が国で最初の気液二相流の研究となっていたはずである。[私史の項のおわり]

8. 3 第Ⅱ期における気液二相流の解析手法の一例(共線図表)

この時期は Table 7. 1 に見られるように、デジタル計算機の創世期の第1世代であり、一般には普及されてなくて、まだ気液二相流の研究には用いられる状況にはなかった。したがって解析手法も8.2の前史期と同様であって、式の形の解析解を求めることが主であった。一方、この時期にはアナログ計算機の出現により(Table 7. 1参照)、第Ⅱ期中期以降では流動の安定性解析にはアナコンを用いる手法が出現した。これについては第7報(Vol.9, No.1, 1995)の2.2で紹介されている)。

なおこの時期では気液二相流の基本的性質の気液間の相対速度(あるいはボイド率)、摩擦損失などの値について研究が進展して、それらの基礎式への適用により、解の精度の向上が計られた。この段階では均質スリップ流モデルが広く用いられていた。またこの頃には、手計算による労力を少なくするために、工学一般では計算図表による解析手法が用いられていた。その一例として水循環の研究に関する筆者の共線図表による方法を紹介する[278,279]。

水循環の基礎式は本質的には式(8-6)のような左辺の水循環の駆動力と左辺の流動抵抗のバランスである。この駆動力は降水管と上昇管中の流体の密度差によるものである。上昇管中のボイド率分布が分かれば定まる。従って計算の出発点はボイド率分布の算定である。管長に沿う任意の加熱量分布(蒸発量分布)に対するボイド率の算出は次のように求められる(一様加熱の場合のよう

に解析的な式では表されない)。正確なボイド率の算定には相対速度あるいはスリップ比の値が必要である。この1950年代の始めではこの十分な資料が無く、筆者の知るものでは米国のMumfordらによる95at, $u_0 = 0.54 \sim 0.66 \text{ m/s}$ のデータ[381]とドイツのBehringerの25, 40ata, $u_0 = 0$ (水は循環しない)の測定値[22]のみであった。これらのデータと筆者の空気-水気液二相流の実験から、筆者は相対速度を次式で表した。

$$u_r = 1 + k \alpha \quad (8-18)$$

ここで1は単独気泡の上昇速度、 k は循環速度により定まる定数で0～2程度の値である。この関係式と蒸気と液の質量バランスから、簡単な計算によりボイド率に関して次の関係式が得られる。[278]

$$\begin{aligned} & (G_d/kF) \{ (1/\gamma_g) - \{ (1/\gamma_g) - (1/\gamma_l) \} \} \\ & - (u_0/k) \alpha + \{ 1 + (1/k) (1/\alpha) \} (\alpha^3 - \alpha^2) = 0 \end{aligned} \quad (8-19)$$

この式はボイド率 α と特性数 (G_d/kF) 、 (u_0/k) 、 $(1/k)$ の4変数の関係式であって、解の関係は次のように共線図表で表すことが出来る。たとえば4個の変数(あるいはパラメータ) G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 の共線図表の模式図はFig. 8. 5のようである。直線上の各値が解であり、たとえば直線AB上の(a)点の G_{1a} 、 G_{2a} 、 G_{3a} 、 G_{4a} の値が解である。

Fig. 8. 5 Explanation of principle of colinear calculation diagram. (共線図表の説明図)

このような共線図表では各パラメータ(変数)の影響が容易に求められる。たとえば G_{1a} の値を固定して(A点)、 $G_{3a} = \text{一定}$ として G_2 を変えて行くと(直線定規でA点を固定して定規をずらしてAC, AD...とすると、 G_4 の値が G_{4a} 、(b)点の G_{4b} 、(c)点の G_{4c} ...のように順次に求められるのである。コンピュータの無かったこの時代では式(8-19)を個々のケースについて計算することは極めて煩雑であったが、このように一度、計算図表を作製しておけば、あとは容易に解の特性を求めることが出来たのである。

さて、式(8-19)については筆者によりFig. 8. 6の計算図表が作製されている[278]。すなわちこの図は4個のパラメータ (u_0/k) 、 (G_d/kF) 、 $(1/k)$ 、ボイド率 α (原論文の図においては f_d の記号)の共線図表と圧力の影響の補助図表から構成され

Fig. 8. 6 Colinear calculation diagram for void fraction (Akagawwa) [278]. (ボイド率算出用の共線図表、(赤川))

ている。これによってある循環速度 u_0 の場合(上記の G_1 ＝一定に対応)に任意の蒸発量分布 $G_d(G_2$ に対応)に対してボイド率 α の分布(G_4 に対応)が容易に求められる。

このような共線図表は簡便さのためにコンピュータの無かった時代では有用であったが、現在でも機器の計画、設計の際に、主要目の推定および各関係因子の影響などを直感的に知ることが出来て活用も考えられる。なお当時に計算図表の作製法を記述した小倉金之助著「計算図表」(岩波書店)の名著があって、利用された。

9. 本研究史第Ⅱ～Ⅳ期における気液二相流動不安定の理論的解析手法の変遷

9. 1 総説

第Ⅱ期における流動不安定の実験的研究の進展については第8、9、10報で紹介した(Vol.1, No.4, 1997)(Vol.12, No.1, 1998)(Vol.12, No.3, 1998)。その実験的研究と対応する理論的研究の進展について、本報以降において、モデルと基礎式の面に主としての視点から、第Ⅱ期から第Ⅳ期にかけての研究の流れを解説する。この期間の流動不安定の研究、文献は膨大な量であり、個々の研究を紹介することは本研究史の趣旨ではないので、本節では次のような構成で歴史的な進展の解説を試みる。(1)気液二相流の工学が0から出発して漸次に体系化され、総合的な著書としてまとめられた経過、(2)大学における学位論文にみられる気液二相流の流動不安定の研究の進展、(3)各期における気液二相流の流動不安定の研究手法の発達と変遷。

9. 1. 1 気液二相流の著書、総説にみられる進展

気液二相流のダイナミックスが一つの学問体系として最初に現れたのは1967年のEURATOMの“Symposium On Two Phase Flow Dynamics”であり、ここでは11ヶ国の62編の発表論文の大規模なシンポジウムであった(第10報、6. 3. 3で紹介されている[237][238])。これによりこの時期ではすでに欧州の各国で原子力に関連して気液二相流の研究がかなり多く行われていたことを示している。

著書として最初のものは第Ⅱ期の1969年のWallisの“One Dimensional Two Phase Flow”[27]であって、その中で解析手法として「均質等速流モデル」、「分離流モデル」、「ドリフトフラックスモデル」および「環状流モデル」がすでに解説されてい

る。また1970年にはHewittらにより“Annular Two-Phase Flow”[28]が出版されて、流動様式の中の一つである環状流に対する理論と実験が詳細に解説されている。

つづいて第Ⅲ期の1974年に筆者の「気液二相流」[29]が出版されて、「流動様式」、「ボイド率」、「圧力損失」などの共通の項目と共に「気泡流」、「スラッグ流」、「環状流」の個別的項目および「二相流中の圧力波」、「二相臨界流」などの特定性質の項目による体系化の分類と解説がなされている。この時期にはWallisの著書以外には参考とする資料はなく、このような独自の体系化を試みたのであった。以上の著書ではまだ流動不安定のような気液二相流の動的特性すなわちダイナミックスに関する記述はなされていない。

ところでこの第Ⅱ期では気液二相流の動的特性に関して個々の研究が始められて、第Ⅲ期の初期からそれらが進展しつつあり(Table 7. 1 参照)、1971年にはBouréらの「気液二相流の流動不安定のレビュー」[250](第10報、6. 3. 5 参照)によりこの時までの流動不安定の研究結果の体系化と総説がなされている。すなわちこの問題が原子炉の安全性に関する重要な研究事項となっていた状況がわかるのである。

また第Ⅲ期の1975年にはIshiiの「Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow」[272]が出版されて、気液二相流の解析の基礎となる方程式に関して厳密な考察が示されて、各種のモデルと手法の数学的定式化が明確に定義、分類されて解説されている。これはそれ以降の理論的研究の基礎としての指針を与える画期的なものであったと思える。またソ連においても気液二相流の著書「Hydrodynamics of Gas-Liquid Systems」(Kutatelazeら)[280]により流動のみならず、伝熱を含めた気液二相流の実用的な工学、技術が体系づけられている。

また我が国においては第Ⅲ期の1977年には気液二相流のダイナミックスと流動不安定に関する現状を広く紹介する報告書が出されている。これは機械学会の“気液二相流研究分科会”の「気液二相流のダイナミックスに関する研究」[124]の197ページの報告である。これは23名の委員、42名の参加者による国内、国外の研究の紹介、特に流動不安定の問題が重点的に取り上げられて総合的に解説されている。このようにこの時期では日本国内において広く大学、研究所および企業の間で共同の

調査、情報交換がよく行われていたことは特筆に値するのである。

なお第Ⅲ期の終わりの1979年に「二相流のダイナミックスに関する日米セミナー」(The JAPAN-U.S. Seminar on Two Phase Flow Dynamics)が開催された[282]。このセミナーでは“流動不安定”、“流動様式”、“圧力波伝搬”、“臨界流とLOCA”の4セクションがあり、流動不安定について5編、LOCAについて4編の発表があり、また日本における気液二相流のダイナミックスの研究の現状が大規模なアンケート調査により研究題目、研究者リストなどがまとめられて、42ページの大部の報告および我が国における気液二相流の流動不安定の研究の総説が提示されている[283]。これによってこの時期に我が国ではこの分野の研究が広く行われていたことが分かるのである。このProceedingは後に著書の「Two-Phase Flow Dynamics(Japan-U.S. Seminar 1979) (Hemisphere Pub. Cop.)」[281]として出版されている。

この日米セミナーのような国際的な会合を特定分野(たとえば気液二相流)で日本で主催するようなことは当時の一般的な感覚では夢のようなことであった。しかし石谷先生の先駆的な発想による発議で計画を進めて、日本学術振興会と米国の科学財団の支援によって始めて開催することが出来た。当時は今日とは違って、まだFAXもTelexも大学にはなくて、手紙のみで米国と交渉と手続きをするような困難があったが、上記の国内の気液二相流の研究グループの実績と委員の努力で開催にこぎつけることが出来たのである。このセミナーの米国側のオルガナイザーのBergles教授は後にASMEのPresidentになられたような実力者であり、他のメンバーも第一級の方たちであり、また米国大使館の科学アタッシュが調査で参加された。これらの方々がこのセミナーを高く評価されて、その後4年ごとに第4回まで開催された。これによって日本の若手研究者が国際会議の経験を積み、また米国の気液二相流関係の有力教授との接触を密にすることが出来て、今日の混相流学会における大規模な国際会議への道を開き、繋がったものと思われる。

さらに第Ⅳ期にはいる頃には、流動不安定問題は原子炉の安全性に関連して重要視されるようになり、そのことは1980年にはLaheyらにより「軽水炉の流動不安定のアセスメント」[284]の報告では

316編の論文が紹介されていることから推察される。また著書として1981年に植田による「気液二相流」[31]が出版されており、この本では流動のみならず、二相流の伝熱現象を含めた体系としてまとめられている。さらに1982年には国際的な執筆者47名の混相流のハンドブック「Handbook of Multiphase Systems」(Hetsroni編) [285]がだされて、気液だけでなく固気および固液の混相流としての体系でまとめられている。この本の中にはIshiiによる「気液二相流の不安定および波動現象」の章が含まれている。これによってこの頃に混相流の研究が一つの段階として熟成してきたものとみられる。

また1984年には我が国において、「管路系および容器内の気液二相流の流動現象に関する総合的研究」の261ページの大部の報告書[267]が出されている。これは文部省科学研究費(B)による参加者102名、19大学、5高専、6研究所、12企業の組織による調査、研究であり、従来の気液二相流の項目の他に「低温流体二相流」、「液体金属二相流」、「二液混合系二相流」などを含む13項目についての国内、国外の文献の整理と解説がなされている。例えば「流動安定性」の項目では1982年までの欧文文献150編、邦文文献37編の合計187編が紹介され、また「基礎方程式」の項では欧文文献109編、邦文文献5編の合計114編があげられている。このように我が国においては産官学で協力してよく情報交換がおこなわれていて、流動安定問題、解析手法についての共通の背景と認識がえられるような体制になっていたのである。

この成果が基礎となって、さらに共同作業により1989年には「気液二相流技術ハンドブック」[253]が機械学会の下で発刊された。この本では従来の本の項目に加えて、急速に発展しつつあった解析手法に関係して基礎方程式、構成式さらに“適切問題”、“仮想質量問題”などの最新の研究成果などが含まれている。また「流動不安定」に関しては不安定現象の分類、説明のみならず各種の安定性解析手法の解説も記述されている。

また第Ⅳ期の後期の1986年から1988年にかけて「流動安定問題」、「原子炉の熱水力学挙動」の理論解析、数値解析についての報告書「原子炉における熱流動解析の現状-I、II、III」(日本原子力学会) [286~288]が出されて、当時の最新の解析手法が多く研究者により詳細に解説されている。

以上のように、研究史の第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ期を通じ

て著書、学会などの報告書などの内容から気液二相流の研究の進展状況、その成熟および新たな展開の状況が分かるのである。これらの各種の項目についての時期的な関係はTable 7. 1 について見られたい。

9. 1. 2 学位論文から見る流動安定性研究の進展

本研究史の第Ⅲ期から第Ⅳ期(1970~1980年代)にかけて、流動不安定問題が学位論文として多く研究されていて、Table 7. 1 の③欄に見られるような進展がみられる。このことは流動不安定問題が当時の原子力発電の急増期にあって、実用技術、工学上で重要な問題であったことを示している。

学位論文としては第Ⅱ期の1965年のBouréの論文[289]が先駆的なものであり、第Ⅲ期では急増している。第Ⅲ期の始めの1971年にGeorgia工科大学でIshiiの学位論文[271](Zuber教授の指導による)で流動不安定が理論的および実験的に研究されて、理論的に有用な安定性判別線図が提出されている。この時期の研究では気液間の熱的平衡の仮定に基づいているが、これはさらに進展されて1974年には熱的非平衡(サブクール沸騰を考慮)を考慮した解析と安定性判別線図がSahaの学位論文[290]となっている(これらについては後述する)。これらの一連の研究はさらにSaha, Ishii, Zuberによりまとめて報告されている[291]。

また我が国においては次のような研究がある。1971年のIshiiの論文と同じ年度に坂口(神戸大学)の“蒸発管系の動特性”の学位論文(大阪大学)[292]により貫流蒸発管系の動特性の実験と線形解析との対応が示されている。また1972年には松井(筑波大学)の“蒸発管系の流動不安定”の学位論文(大阪大学)[293]では自然循環系の実験と新しい解析が示されている。さらに小沢の“蒸発管系の流動不安定”の学位論文(大阪大学)[294]においては不安定流動の種類の中で、密度波振動、圧力降下振動およびガイセリングの全体像の総合した研究が行われている。また1977年には有富の“並列蒸発管系の不安定”の学位論文(東京工業大学)[295]で並列管系の自然循環の特性が実験と解析で明らかにされている。この時には当時の大型コンピュータによる解析が行われている。(Table 7. 1 によってこれらの研究の時期とコンピュータの発展の時期との対応を見ていただきたい)。これらの学位論文に関係して当然のように多くの学会の論文が発表されている。なお1974年には芹沢(京都大学)の学位

論文“Fluid-Dynamic Characteristics of Two-Phase Flow”[382]により、気泡流から環状流にいたるまでの流れの微細構造、乱れ特性などが解明されて、気液二相流のダイナミクス解析の基礎が提示されている。これらの流動不安定に関する学位論文の著者の方々は後に混相流学会の会長もしくは役職につかれて活躍されていることは注目に値する。これを別の視点から見ると、この分野が工学と当時の原子炉関係の実用技術の面で重要であったことを裏付けているのである。

以上のように我が国においては第Ⅲ期に各大学において流動不安定の研究が盛んであり、学術面のみならず、実用技術の原子炉の安全性の工学の進展に寄与した。た第Ⅳ期の1988年には古寺(日立造船)の自然循環の不安定についての実物規模の実験装置による詳細な実験と線形解析がなされて、設計指針が明らかにされている。これは大阪大学の学位論文[296]となっている。

参考文献

- [274]宮城音五郎：Theory of the air-lift pump with special referennce to the slip of the air bubble in water. 機械学会誌、第27巻、第85号、335-384(1927).
- [275]Miyagi, O. : Themotion of air bubblerising in water . Phil . Mag . Vol .50, No.295,112-140(1921).
- [276]Schultes, W. : Der Wasserumlauf in Steinrohrkesseln. Dissertation, Darmstadt, 1929.
- [277]久武真直：堅型水管缶に於ける缶水の循環について、機械及び電気、第4巻、第9号、1333(1939).
- [381]Mumford, A.R., Humphreys, C.G.R.: An Investigation of the Variation in Heat Absorption in a Pulverized-Coal-Fired Water-Cooled Steam Boiler Furnace. Ⅲ. Variation in heat Absorption as shown by Density and Velocity Measurements of Flow in a Tube. ASME, Trans. Vol. 90, 587-609(1948).
- [278]赤川浩爾：相対速度および不均一加熱を考慮したボイラ水循環計算法(第1報)、機械学会論文集、19-88, 40-44(1953).
- [279]石谷清幹、赤川浩爾：ボイラの水循環、コロナ社(1953)、および上記の改訂版(1953).

- [280] Kutateladze, C. C., Strikovich, M. A.: Hydrodynamics of Gas-Liquid System. Energia(1976).
- [281] Pro. Japan-U.S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics. (Kobe), (1979).
- [282] Bergles, A. E., Ishigai, S. 編: Two-Phase Flow Dynamics. Hemisphere Pub. Corp. (1979).
- [283] Akagawa, K.: Recent Research on Two-Phase Flow in Universities and Colleges in Japan. 1-42(1979)(文献[282]). Nakanishi, S.: Recent Japanese Researches in Two-Phase Flow Instabilities. 55-105(1979)(文献[282]).
- [284] Lahey, R. T., Drew, D. A.: An Assessment of the Literature Related to LWR Instability Modes. Rensselaer Polytechnic Institute. NUREG/CR-1414 (1980).
- [285] Hestroni, G. 編: Handbook of Multiphase systems. Hemisphere Pub. Corp. McGraw-Hill Book Comp. (1982).
- [286] 原子炉における熱流動数値解析の現状、日本原子力学会(1986).
- [287] 原子炉における熱流動数値解析の現状(Ⅱ)、日本原子力学会(1987).
- [288] 原子炉における熱流動数値解析の現状(Ⅲ)、日本原子力学会(1988).
- [289] Bouré, J.: Contribution of l'Etude Théorique des Oscillations dans des Docteur en ingénierie, Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble. (1965).
- [290] Saha, P.: Thermally Induced Two-Phase Flow Instabilities, including The Effect of Thermal Non-Equilibrium Between The Phases. PhD Thesis, Georgia Institute of Technology(1974).
- [291] Saha, P., Ishii, M., Zuber, N.: An Experimental Investigation of the Thermally Induced Flow Oscillations in Two-Phase Systems. Trans. ASME. J. of Heat Trans. 616-622(1976).
- [292] 坂口忠司: 強制流動蒸発管における圧力損失の研究. (学位論文、大阪大学(1971)).
- [293] 松井剛一: 沸騰二相流系の流れの安定性に関する研究. (学位論文、大阪大学基礎工学部) (1972).
- [294] 小澤守: 蒸発管系の不安定流動に関する研究. (学位論文、大阪大学).
- [295] 有富正憲: パラレル沸騰チャネルの不安定に関する研究. (学位論文、東京工業大学).
- [382] Serizawa, A. (芹澤昭示): Fluid-Dynamic Characteristics of Two-Phase Flow. (Kyoto University). (学位論文、京都大学) (1974).
- [296] 古寺雅晴: 自然循環ボイラにおける水循環の動的特性と不安定流動に関する研究(学位論文、大阪大学).