

人と熱との関わりの足跡（その13）
—ボイラの水循環と気液二相流研究の展開—

Footprints of the Relationship between Humans and Heat (Part 13)
- Water Circulation Problems in Boilers and the Development of Two-Phase Flow Research -

小澤 守 (関西大学)
Mamoru OZAWA (Kansai University)
e-mail: ozawa@kansai-u.ac.jp

1. はじめに

本稿は第二次世界大戦後に始まった我が国における気液二相流研究の開始時から、おおよその体制が整った1980年中盤、すなわち1947年からの約40年間に焦点をあて、その中心的存在であった関西地区での二相流研究の展開を概観するものである。ボイラの水循環に関しては1920年に出版されたMünzingerの均質流モデルに基づく理論的研究[1]が最初とわかっていまいだろう。ただし気液二相流と認識された研究が行われた最初は1920年代の末期のErnst Schmidtのグループによるものであろう。その目的は、当時すでに大容量ボイラを中心であった自然循環原理に基づく水管ボイラの水循環問題解決のためであった。本稿では自然循環ボイラの水循環問題に端を発した二相流研究の発展の歴史を辿る。

2. ボイラの水循環

自然循環ボイラでは

$$[\text{循環力}] = [\text{降水管の流動抵抗}]$$

$$+ [\text{上昇管の流動抵抗}]$$

によって水の循環が駆動される。加熱量（燃焼量）の増加とともに蒸発管内のクオリティ、直接的にはボイド率が増加、降水管と蒸発管（上昇管）との水頭差が大きくなり、上昇管内の流動抵抗の増加を凌駕して、循環流量は増加する。しかし加熱量がある程度大きくなると上昇管内の流動抵抗（摩擦損失）が大きくなり、水頭差に対応するには循環流量が低下しなければバランスしないことになる。しかも自然循環ボイラでは上昇管出口のボイド率が0.7~0.75程度を超えると、のちに述べる密度波振動が生じ、安定運転限界が存在する。

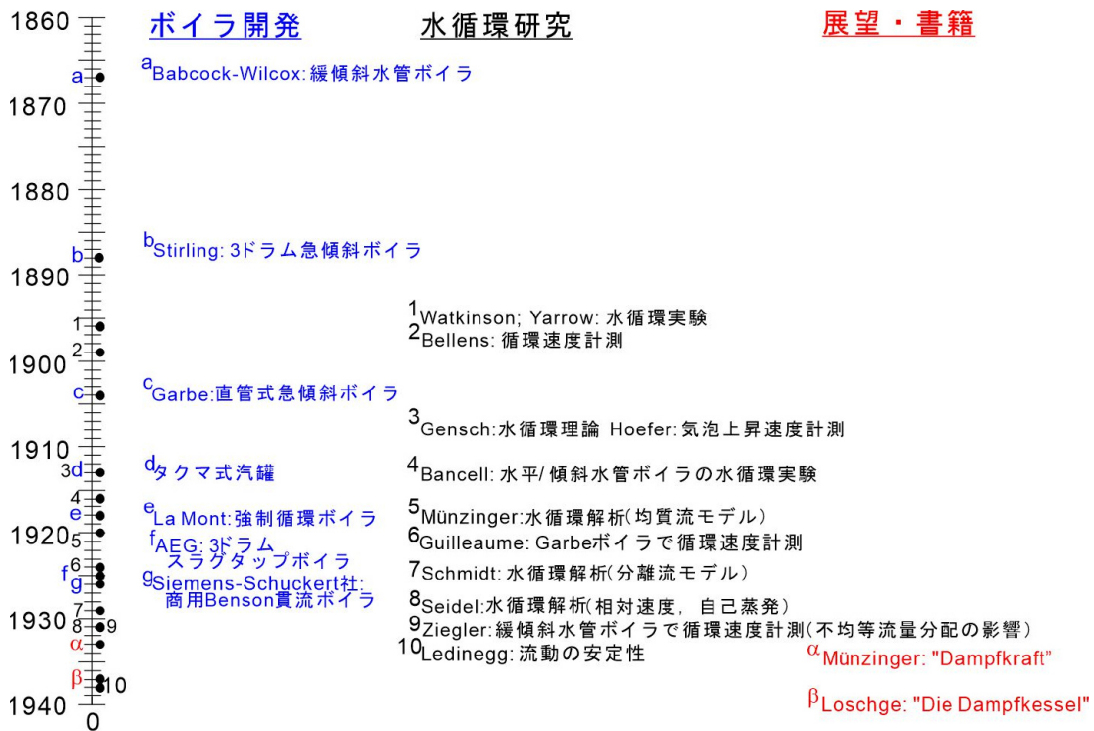


図1 ボイラの水循環に関する研究開発の経緯

つまりは自然循環ボイラの水循環設計には管内のボイド率分布，二相流の摩擦損失，これらの時間平均値ならびにダイナミクス（時間変動特性）の解明が必須の要件となる。

図1に1860年代を起点として，ボイラ開発，主として自然循環ボイラの主だった開発の経緯，対応した水循環研究の経緯，さらに研究開発の展望や代表的な書籍を示す．なおここで取り上げているのは著者が重要と判断したもののうちさらに代表的と選別したもののみであり，偏りがあるかもしれないが，全体的な流れは理解できるものと考えている．

図中の●にはアルファベット，数字，ギリシャ文字がついている．それぞれボイラ開発，水循環研究，展望・書籍の各項目に対応する．各種ボイラがどの年代で開発あるいは初出したかがわかる．1860年から1940年までの間で，行われた多くの研究は，水循環を意図しながらも気液二相流という観点からは希薄であった．つまりは相対速度の存在などに対する認識はあったものの水循環の定式化までに至ったものは1920年のMünzingerの水循環計算[1]が最初であった．

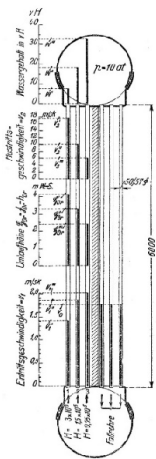


図2 Münzingerの水循環モデル[1]

図2はMünzingerが用いた自然循環モデルを示す．実際のボイラでは水管は垂直のみならず傾斜，水平などの部分もあるが，彼のモデルではすべて垂直とし，水管の上下端に蒸気ドラム，水ドラムが想定されている．中央の斜線が施された断熱壁を挟んで右の管群は降水管，左が上昇管である．水循環の基本は先に記載した関係式であるが，これを具体的に示せば次のようになる．

$$h^F - h = \left[h_e^F + h_R^F + \xi \frac{v_1^2 \rho_w}{\rho_0 g} \right] + [h_e + h_{Be} + h_R + h_B + h_a]$$

ここで h は水頭，上付きの F は降水管， e は入口， B, Be は加速， R は摩擦， a は出口を表す．また λ は管摩擦係数， v は流速， g は重力加速度， ρ_w は飽和水の密度， ρ_0 は4°Cの基準密度， d は管内径で降水管も上昇管も等しいと仮定， ξ, ζ は係数，添え字1は蒸発管入口での値，2は蒸発管出口での値， L を降水管，上昇管の長さとする．各項は，降水管，上昇管入口損失：

$$h_e = h_e^F = 1.1 \frac{\rho_w}{2\rho_0 g} v_1^2$$

$$\text{降水管での摩擦損失: } h_R^F = \frac{\lambda}{2\rho_0 g} \frac{L}{d} \rho_w v_1^2$$

上式中括弧内第3項目は降水管から水ドラムへ流入に伴う圧力回復項である．一方，上昇管側では降水管と同じ入口損失があるとする．

$$\text{上昇管入口での加速損失: } h_{Be} = \frac{\rho_w}{2\rho_0 g} v_1^2$$

$$\text{蒸発管での摩擦損失: } h_R = \frac{1}{2d\rho_0 g} \int_0^L \lambda v^2 \rho dl$$

$$\text{蒸発管での加速損失: } h_B = \frac{\rho_2 v_2^2}{\rho_0 g} - \frac{\rho_w v_1^2}{\rho_0 g}$$

$$\text{蒸発管出口での出口損失: } h_a = \zeta \frac{\rho_2 v_2^2}{2g\rho_0}$$

気液二相流を均質流モデルで表現すると

$$h_R^F = \frac{\lambda}{2\rho_0 g} \frac{L}{d} \rho_w v_1^2$$

$$h_R = \frac{1}{2d\rho_0 g} \int_0^L \lambda v^2 \rho dl = \frac{1}{\rho_0 g} \frac{\lambda}{2d} \rho_w v_1^2 L \left[1 + \frac{x_2}{2} \left(\frac{\rho_w - \rho_D}{\rho_D} \right) \right]$$

ρ_D は飽和蒸気の密度， x_2 は上昇管出口のクオリティである．降水管および上昇管の水頭はそれぞれ

$$h^F = \frac{\rho_w g}{\rho_0 g} L = \frac{\rho_w}{\rho_0} L$$

$$h = \frac{1}{\rho_0 g} \int_0^L \rho g dl = \frac{L\rho_w}{\rho_0} \frac{\rho_D}{\rho_w - \rho_D} \frac{1}{x_2} \ln \left[1 + \left(\frac{\rho_w - \rho_D}{\rho_D} \right) x_2 \right]$$

これらの結果から水循環特性は例えば図3に示す

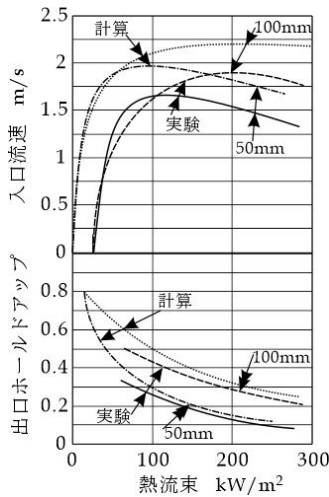


図3 自然循環特性 (データは[1]による)

ようになる。

循環速度は加熱量の増加とともに増加し、最大値に達したのち今度は減少に転じる。管内径が小さいほうが、摩擦損失への影響が顕著であり、最大値に達する加熱量は低くなるなど、定性的な特性はこのモデルでも把握はできるが、実験ではある程度加熱しないとほとんど動かないことや絶対値に差異がある。この点については Münzinger 自身も気液間の相対速度の存在などが原因であるとの認識は持っていたが、彼は研究者というよりより実務家、設計者的な側面が強く、解析モデルの詳細を詰めるよりは設計計画の大局的な指針を示す方向に活動を広げていったように思う。彼の集大成ともいえるべき Dampfkraft [2]が1933年(第2版, 第3版は1949)に出版されてからも少なくとも90年以上経過しているが、その基本的なコンセプトはいまなお活用できる。

蒸発管内の二相流をのちに分離流モデルといわれる形式でモデル化を行ったのが Ernst Schmidt [3]である。急傾斜ボイラ、あるいは上昇管高さがある程度大きくなると、蒸発管に沿って静圧が低下し、当然飽和温度も低下して自己蒸発が発生す

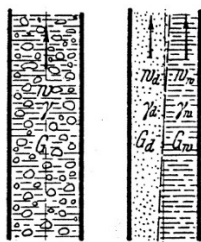


図4 Schmidt の二相流モデル[3]

る。したがって気液間の相対速度と自己蒸発を考慮したモデルの形成が不可欠であるとの認識から図4に示すような二相流のモデル化を行った。左が本来の二相流、右が単一の界面で両相が区切られたモデルである。添え字 d は蒸気相, w は液相を表す。

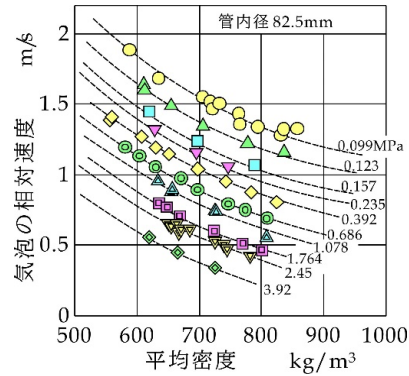


図5 Behringer の実験結果 [4]

Schmidt の弟子の Behringer は試験部が 6.1 m, 全長が 13 m の実験装置を用いて気相の相対速度を実験的に求めた[4]。相対速度の実験結果を図5に例示しておく。相対速度はおおよそ平均密度に対して $w_{Dr} = C/\rho$ で近似でき、気相速度は

$$w_D = \frac{G}{f\rho} + w_{Dr}$$

と表される。さらに自己蒸発の影響は

$$c = \frac{dx}{dp} = \frac{1}{s_D - s_w} \frac{ds_w}{dp}$$

これらを用いて降水管と上昇管の圧力バランスから循環速度は解析的に次式のように与えられる。

$$\frac{w_0^2}{2} = \frac{y_a - 1 - (1+B) \ln \frac{y_a + B}{1+B}}{A(m + ny_a)}$$

ここで

$$y_a = \frac{\rho_w}{\rho_a}, A = \frac{D}{\left(\frac{G}{f} + C\right) \frac{\rho_D}{\rho_w - \rho_D} - \frac{c}{\rho_w} \left(\frac{G}{f}\right)^3}, B = \frac{cgG\rho_w}{Df}$$

$$m = 2\zeta + \frac{3}{2}\lambda \frac{\ell}{d}, n = 2 + \frac{1}{2}\lambda \frac{\ell}{d}$$

なお f, G, D は気相の通過面積, 質量流量, 単位体積当たり蒸気発生量である。

3. 我が国における事業用火力発電所建設の経緯 産業発展は発電電力量の増加に大きく依存する。

図6は1907年(明治40年)以降の我が国の発電設備容量の推移である[5-7]。2010年以降, 新エネ(再生可能)の急激な増加が認められるが, 実際の発電量を指しているわけではない。明治~昭和初期に海外から導入されたボイラは6割超がBabcock & Wilcox社製であった(表1)[8-10]。もちろん国産ボイラがなかったわけではなく, タクマ(田熊汽罐製造)が2位の位置についている。その他の国内企業のうち三菱長崎はGarbe 缶や自主開発の3ドラム型, 三菱神戸はセクショナル缶, 日立はヤロー缶などを製造していた[11]。

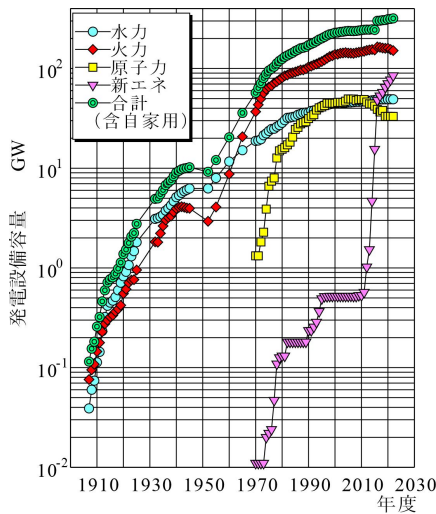


図6 発電設備容量の推移 [5-7]

表1 汽罐統計 (データは山崎[10]による)

| 水管ボイラ | 内務省 社会局 | 1936年 汽罐統計 | 1940年 汽罐統計 |
|------------------|------------|---------------|---------------|
| Babcock & Wilcox | 1320缶 | 984缶 | 980缶 |
| タクマ | 177 | 244 | 419 |
| Garbe | 105 | 18 | 21 |
| Heine | 77 | 32 | 69 |
| Stiring | 47 | 33 | 36 |
| Elicity | 34 | 32 | 18 |
| Sulzer | 27 | 13 | 8 |

内務省社会局のデータは1933~34年頃にとられたもの, また汽罐統計は厚生省による

1933~1940年頃の国内ボイラ数は表1のようになっている。明治期から1940年代まで通してみても, 水管ボイラについてはタクマや池田式を除いて圧倒的に海外からの輸入あるいはライセンス生産であった。このような状況は第二次世界大戦後も継続される。1950年代になってもボイラに関しては表2のように海外各社の技術が導入され, 政

表2 1950年代の技術提携 [11,12]

| 会社名 | 海外企業 |
|---------|---|
| 三菱重工 | Combustion Engineering, Sulzer Brothers |
| バブコック日立 | Babcock & Wilcox |
| 石川島播磨 | Foster Wheeler, Sulzer Brothers |
| 横山工業 | VKW (Bensonボイラ) |
| 汽車製造 | VKW (Bensonボイラ) |
| 川崎重工 | La Mont |
| タクマ | Sulzer Brothers, Clayton |

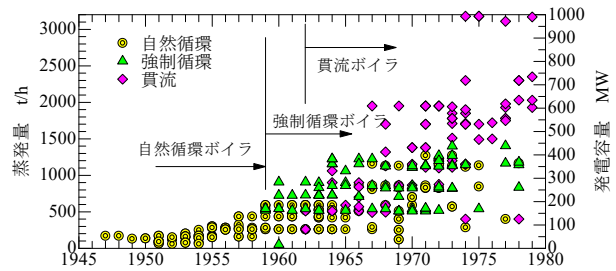


図7 戦後日本の発電所の発電容量と蒸発量の推移 (各年度の最大容量でボイラ形式を区分, データは宇治田, 玉井[12]による)

府も積極的に推進していた。

戦後復興はまず発電所建設から始まったといっても過言ではない。図7は1946年以降1979年までの間に建設された発電用水管ボイラの蒸発量を年度に対して示したもので, 記号によってボイラの形式, すなわち自然循環ボイラ, 強制循環ボイラ, そして最大級の貫流ボイラを区別している。

敗戦後から1959年まで, 新造の火力発電所のボイラの蒸発量はせいぜい500 t/hで, ほとんどが自然循環ボイラであった。1959年には日本で初めて強制循環ボイラが建設された。この頃の最大級の蒸発量は1200~1300 t/hでほとんどが強制循環ボイラであった。火力発電で貫流ボイラが出現したのは1962年が最初であるが, 強制循環ボイラを超えて2000 t/hの蒸発量になったのは1967年で, 以降, 最大の蒸発量はすべて貫流ボイラによるものとなった。1974年には蒸発量は3200 t/h程度にまで達し, 発電容量としては1000 MWとなった。

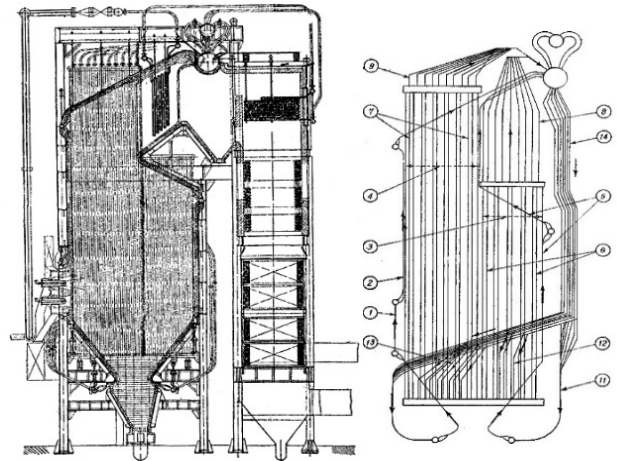
全体を概観して, 自然循環ボイラは蒸発量500 t/h, 圧力13 MPa程度, 強制循環では蒸発量1400 t/h程度まで, 圧力16.5 MPa, 貫流ボイラが主力になるのは1200 t/h以上で圧力は25 MPaである。なお戦後復興期には, 我が国のボイラはほとんどが自然循環ボイラであり, なかでも最新鋭はほとんど

が技術導入によるものであった[12].

4. 我が国における水循環と二相流研究の嚆矢

上記のような状況の中で、石谷清幹のリーダーシップの元、赤川浩爾をはじめとする大阪大学のグループが当時主流であった自然循環ボイラの水循環設計基準を構築するために気液二相流問題に1947年頃から取り組んだ。降水管は基本的には単相流であり、問題は上昇流の気液二相流にあった。均質流モデルに関しては先に Münzinger の著書[2]あるいはその翻訳（高瀬謙一訳、ミュンチングル蒸気原動力、上下、コロナ社(1939)）があったし、Schmidt の論文なども当然公表されていた。しかし石谷らがあえて水循環の研究に取り組んだのは以下のような事情による。

石谷の「最近つくられるボイラは、陸用船用をとわず、いずれも旧来の形式を脱却した新形式になってしまった。新設計ボイラに対する安全を確保する必要に迫られて、ボイラメーカーでも使用者側でも水循環に対する関心が大いに高まってきたのは当然の勢いである。所が水循環は計算するにしても実験するにしても容易にはできないし、求められた結果を見てそれでよいのかどうかを判断することがまたむずかしい。」（『ボイラの水循環』[13]の序文）との記述にあるように、原理的には Münzinger [1]や Schmidt [3]の研究成果を実ボイラに展開すればいいのではあるが、実ボイラの水管配置などが解析モデルから大きく離れていて、また燃焼室での取熱にもかなりの分布があり、単純なモデルを適用するには限界がある。またボイラが技術導入の成果であるにしても自ら設計基準を構築せずして我が国の技術の発展はない。実際、石谷・赤川の『ボイラの水循環』[13]に掲載された当時の実用自然循環ボイラの構造を見てみると図8のように水管配置は先に示したモデルほど単純ではなくかなり複雑である。しかも本数が非常に多い。側壁、前壁、後壁の降水管と蒸発管がそれぞれペアになっており、図8の場合には蒸発管の管外径は大半が82.6mm、降水管は101.6mmである。全体をうまくほぐしてやるとある程度の単純化が可能であるようにも見える。そこで彼らは問題になるのはやはり蒸発管内の気相の相対速度と自己蒸発の問題であると判断して、気液二相流の研究を開始した。



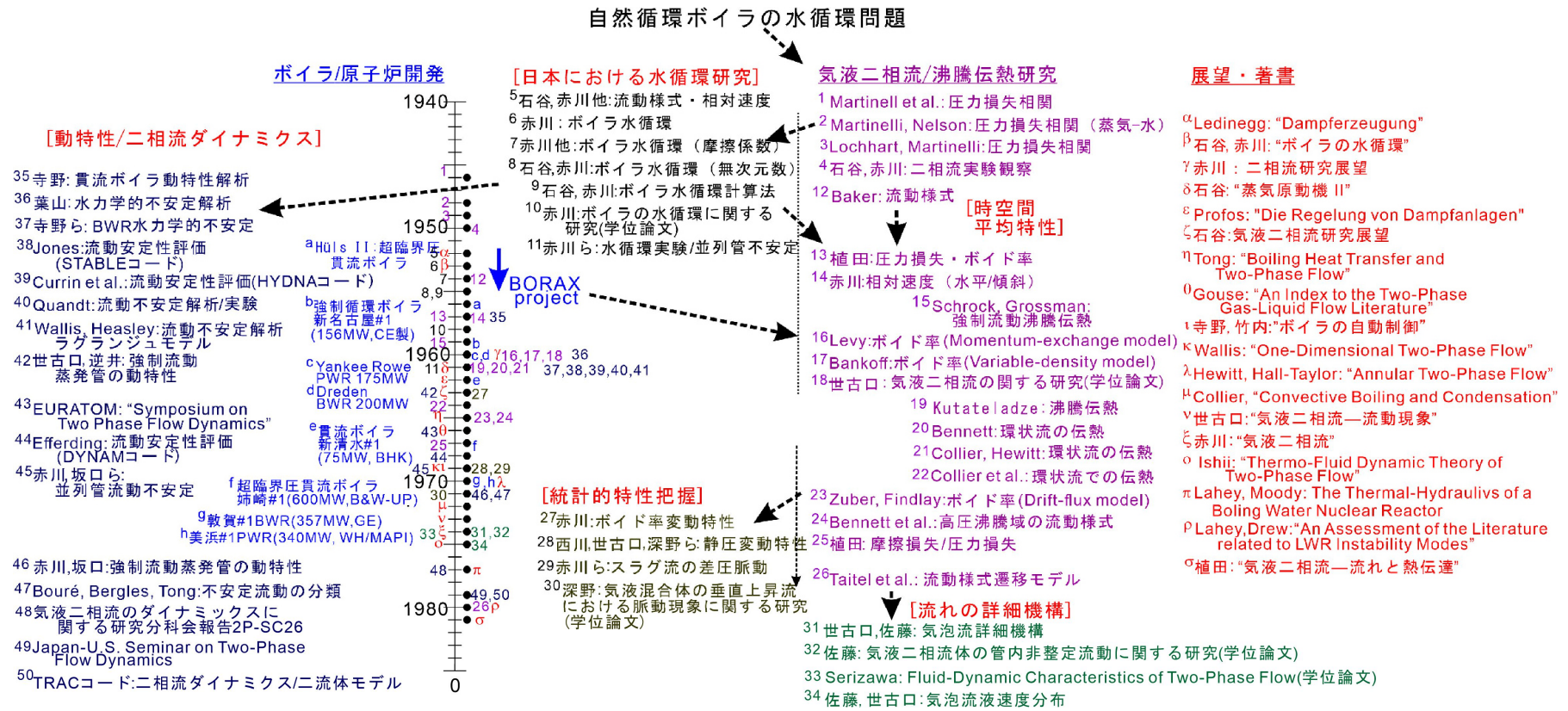
| 番号 | 名称 | 管外径 mm | 本数 | 流速 m/s |
|----|----------|--------|----|--------|
| 1 | 前壁蒸発管(A) | 82.6 | 56 | 1.16 |
| 2 | 前壁蒸発管(B) | 82.6 | 30 | 1.22 |
| 3 | 側壁蒸発管 | 82.6 | 33 | 1.03 |
| 4 | 側壁蒸発管 | 82.6 | 44 | 1.29 |
| 5 | 後壁蒸発管 | 82.6 | 86 | 1.24 |
| 6 | 側壁短絡管 | 101.6 | 8 | 0.9 |
| 7 | 側壁短絡管 | 101.6 | 15 | 1.68 |
| 8 | 側壁上昇管 | 101.6 | 8 | 3.94 |
| 9 | 側壁上昇管 | 101.6 | 10 | 4.66 |
| 10 | 前壁降水管 | 101.6 | 24 | 2.71 |
| 11 | 後壁降水管 | 101.6 | 22 | 3.11 |
| 12 | 側壁降水管 | 101.6 | 5 | 3.62 |
| 13 | 側壁降水管 | 101.6 | 8 | 2.02 |

図8 自然循環ボイラの構造と水循環回路 [13]

表3 ボイラ水循環の根本問題[14]

| | | |
|---------|-----------------------|----------------------|
| I. 流動現象 | A. 推進要因 | 1. 汽水混合物の平均密度 (相対速度) |
| | | 2. 熱負荷・熱負荷分布 |
| | B. 制止要因 | 3. 摩擦損失 |
| | | 4. 形状による損失 |
| | | 5. 給水・缶水管理 |
| | C. 流動現象 | 6. 圧力分布 |
| | | 7. 速度分布 |
| | | 8. 汽水分布 (ボイド率分布) |
| | D. 安定問題 | 9. 単一管 |
| | | 10. 並列管 |
| | | 11. 圧力・流速変動の影響 |
| II. 影響 | E. 管壁温度 (材料強度) に対する影響 | |
| | F. 腐食に対する影響 | |
| | G. スケール付着に対する影響 | |

具体的な彼らの研究成果について述べる前に、ボイラにおける水循環問題の全体像を見ておこう。表3は1955年の石谷、赤川によるボイラの自然循環に関する研究と設計にかかわる総合的な取り組みの記事[14]中に記載されたもので、ボイラの水循環問題の全体像が端的に表されている。すなわちボイラの水循環を流動現象と影響（原著では効果）に分類し、流動現象の範疇では、水循環を促



進する要因, 制止する要因, 流動状態, 流れの安定問題を取り上げている. また水循環は, 管壁温度の変動, 腐食, スケール付着にも影響する. つまりはボイラの目的は安定した蒸気発生で, そのためには安定な水循環が確保されねばならず, ここに挙げた項目が水循環問題の基本と位置付けたのである.

石谷, 赤川らが気液二相流の研究を始めたほぼ同時期に米国など海外では現在でも広く利用されている研究成果が出ていた. 図9は先に示した図1の続きである. 1940年代後半にはMartinelliら[15], Martinelli & Nelson[16]などが圧力損失相関の提案を行っている. 二相流実験の多くは空気と水や空気と油などを用いて行われた. Marinelli & Nelson [16]はいわゆる分離流モデルを展開して, 蒸気-水に適用可能な著名な相関線図を提案した. Lochhart & Martinelli [17]は等温二相流用に

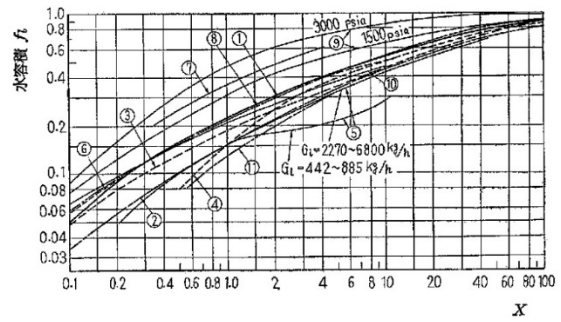
$\phi_L^2 = \Delta p_{TP} / \Delta p_L$, $\phi_G^2 = \Delta p_{TP} / \Delta p_G$, $X^2 = \Delta p_L / \Delta p_G$ の関係で相関を提示した. ここで Δp_L , Δp_G は液相, 気相がそれぞれ単独で管を満たして流れる時の圧力損失である. いま液相, 気相の体積流束を j_L , j_G と定義すると

$$\Delta p_L = \frac{\lambda_L}{2d} \rho_L j_L^2 L, \quad \Delta p_G = \frac{\lambda_G}{2d} \rho_G j_G^2 L$$

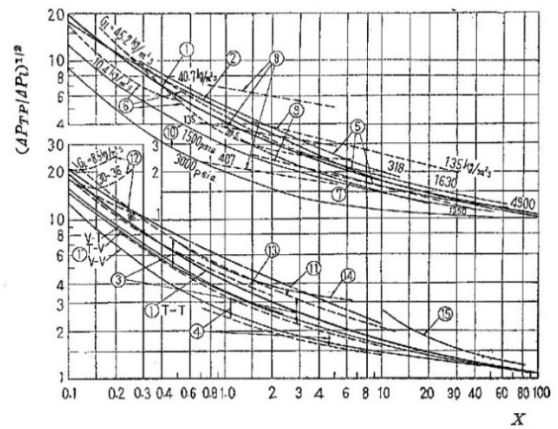
である. 管摩擦係数はレイノルズ数の大きさに応じて層流, 乱流があるので, 液相, 気相が乱流 (tt) 液相: 層流, 気相: 乱流 (vt), 液相: 乱流, 気相: 層流 (tv), とともに層流 (vv)の場合があり, これをChisholm[18]はそれぞれに対して, $C=20, 12, 10, 5$ のパラメータを与え, 次式で近似している.

$$\phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}$$

戦後占領政策の一環として設置されたCIE図書館(のちにアメリカ文化センター)などを通じて海外の情報がわずかながら入手できるという状況の中で, 1947年頃から石谷と赤川は独自に考案した試験部を透明ガラス管(内径50.5mmと24.0mm, 長さ1400mm)で構成した実験装置で, 空気-水二相流の実験を開始した[19]. ボイド率は試験部下部のコックを急閉して管内の水位から算出した. のちに赤川は彼の展望記事[20]の中でこの当時のホールドアップ(1-ボイド率)相関式の比較を行っている. 併せて摩擦損失についても示しておこう.



(a) ホールドアップ



(b) 摩擦損失

図10 ホールドアップと摩擦損失についての各種相関式の比較[20]

図10の横軸は先に定義したLockhart-MartinelliパラメータX, 番号は様々な相関式に対応している. 相関式間でかなりの幅があり, どれを使用して設計すればいいのか判断に困るが, この状況は現在でも基本的に同様である. ただしほとんどの相関式が空気-水二相流実験に基づいており, 設計においては蒸気-水系の実圧のデータに基づいた評価に注意を払う必要がある. なお均質流モデルは低圧では実験結果と相違が大きい, 高圧, 高質量速度領域では十分な精度を有している[21].

気液二相流においては気相流束の低いところで気泡が分散して流れる気泡流, 大気泡が交互に通過するスラグ流(当時, ピストン流と呼んでいた), さらに高速で気相が液滴を伴って中心部を流動する環状流などが目を引く. 流れの構造は当然ボイド率や圧力損失に関係し, そのため流動様式の観察も重要な分野であった. その代表がいわゆるBaker線図[22]である. ただしこの線図は水平流に対するものであり, 垂直流では当然異なったものになる. 流れの幾何学的構造は基本的には体積流

量で決まると考えれば、気相、液相の体積流束で表現するのが最も簡単に思える。現在では垂直流に対する流動様式図としては Mishima-Ishii[23], Taitelら[24]などがよく利用されている。

さて石谷, 赤川による先の装置での相対速度の実験結果の一例を図 11 に示しておく[19].

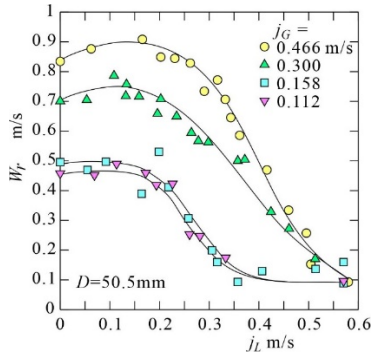


図 11 石谷と赤川による相対速度の実験結果 (データは[19]による)

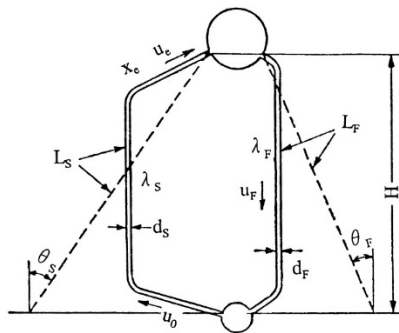


図 12 石谷, 赤川の自然循環モデル[13]

図 12 は水循環の基本モデルである[13]. 図中 $L_S, L_F, \theta_S, \theta_F$ はそれぞれ蒸発管, 降水管の等価長さ, および蒸発管, 降水管の等価傾斜角, d_S, d_F, H は蒸発管内径, 降水管内径, 降水管高さ, u_S, u_F, u_0, u_e は蒸発管流速, 降水管流速, 蒸発管入口流速, 蒸発管出口流速, $\lambda_S, \lambda_F, x_e$ 蒸発管, 降水管の管摩擦係数, 蒸発管出口クオリティである。

このモデルに基づいて運動量バランスを定式化し, 相対速度や自己蒸発の影響を加味した水循環の基本的な定式化ののち, 実際のボイラのデータを用いて係数を決定した結果を図 13, 14 に示している。蒸発管担当蒸発量, 降水管担当蒸発量に対して蒸発管内径, 降水管内径が 20~120 ata にわたって示されている。図中のプロットは各種ボイラの実績値である。これら二つの特性を取りまとめて,

ボイラ水循環の設計指針としたものが図 15 に示す線図[25]である。ここで G_{dS}, G_{dF} は蒸発管 1 本あたり最大連続蒸発量, 降水管 1 本あたり最大連続蒸発量[kg/h], K_S 蒸発管担当蒸発量の無次元特性数, 陸用ボイラで 0.15~0.29, 平均 0.22, 船用ボイラでは 0.2~0.9, K_F 降水管担当蒸発量の無次元特性数 0.2~1.2, 平均 0.6, θ_S, θ_F 等価蒸発管, 等価降水管の傾斜角である

$$K_S = \frac{G_{dS}}{d_S^{2.5} \rho_G} \sqrt{\frac{\lambda_S}{g \cos \theta_S}}, \quad K_F = \frac{G_{dF}}{d_F^{2.5} \rho_G} \sqrt{\frac{\lambda_F}{g \cos \theta_F}}$$

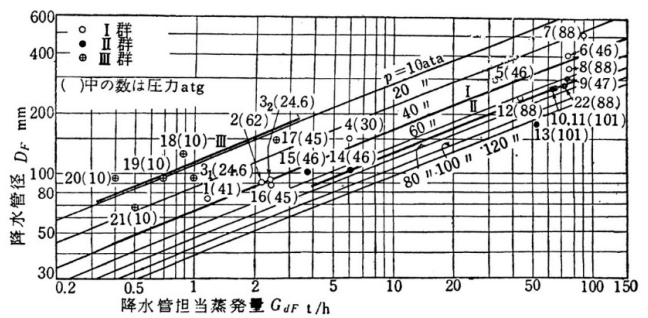


図 13 石谷, 赤川による降水管特性[13]

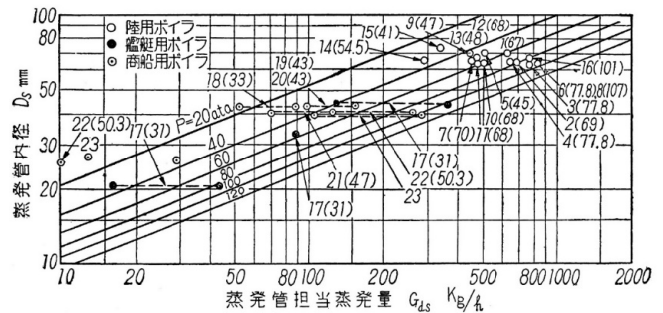
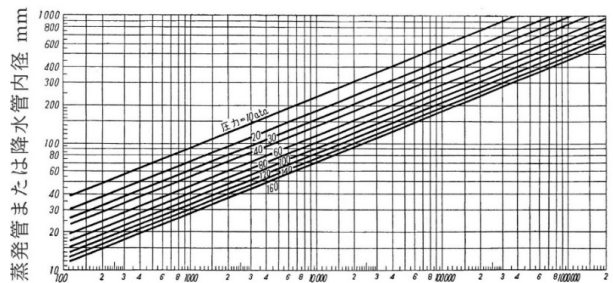


図 14 石谷, 赤川による蒸発管特性[13]



$$\frac{1}{K_S \sqrt{\cos \theta_S}} \sqrt{\frac{\lambda_S}{0.024}} G_{dS} \text{ または } \frac{1}{K_F \sqrt{\cos \theta_F}} G_{dF} \text{ kg/h}$$

図 15 石谷, 赤川による水循環特性[25]

5. 二相流及び伝熱研究概観

石谷, 赤川らが水管ボイラの水循環問題に取り組み始めてから, 一応の成果が得られた 1950 年代初頭, 米国を中心として活発な二相流研究がすでに始まっていた. 沸騰水型原子炉の開発であった. その典型が 1952 年から事実上始まった BORAX プロジェクト[26]であった. 商用沸騰水型原子炉の熱出力密度は 50 MW/m^3 , 火力発電では 2000 t/h の蒸発量の燃焼室熱負荷は 300 kW/m^3 であるのに対しておおよそ 170 倍である. つまり冷却喪失が極めて重要で, 時間的余裕も火力に比べて非常に短い. また炉心ではボイド率が熱出力に直結するため, ボイド率の正確な評価も欠かせなかった. そのような背景から, 図 16 に示す Gouse のデータ[27]にあるように, 二相流研究は急激に増加していった. なお, 図中には 1940 年以前の二相流研究の初期段階の代表的な研究論文の公表時期を合わせて示している. また ASME の Transaction に見る伝熱研究論文数の推移もプロットしており, 二相流研究とほとんど同期している.

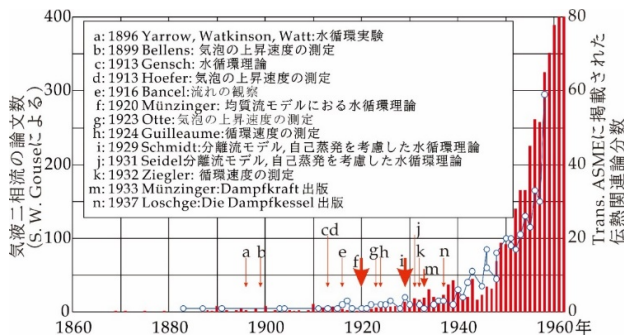


図 16 Gouse による二相流に関する研究論文数の推移 (データは[27]による)

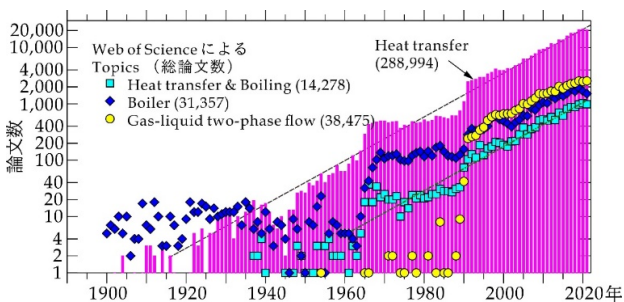


図 17 Web of Science による伝熱, 二相流, ボイラなどの論文数の推移 (Gouse の二相流の論文数と差異があるが, おそらく検索基準の違いや Web 上に掲載されていないなどの原因が関係していると思う)

図 17 は Web of Science を用いて, Heat Transfer, Heat Transfer & Boiling, Boiler, Gas-liquid two-phase flow の各キーワードで検索して, 論文数をプロットしたものである. Heat transfer に関しては 1920 年頃から現在に至るまで, 片対数グラフ上でほぼ直線的に増加している. ボイラ研究は 1970 年以降, 二相流研究は 1990 年以降, この伝熱研究とほとんど同じ傾きで推移しているのは大変興味深い. なお赤川は『ボイラの水循環』(1953)[13]が出版されたとき, 二相流問題はおおよそ片付き, これ以上の研究の必要性はないと思っていたと述懐していた. 二相流研究の牽引がボイラから原子力に代わっていたが, 当時そのような情報に触れることが困難な社会的状況が続いていたのだろう.

6. 時空間平均特性に関する研究

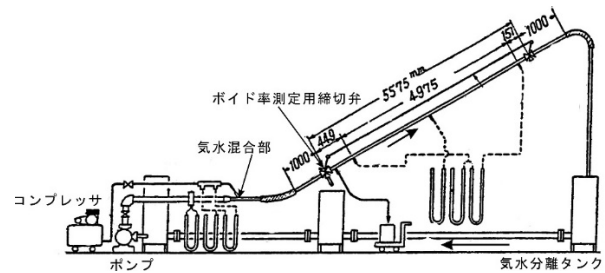


図 18 赤川らの傾斜管実験装置[28]

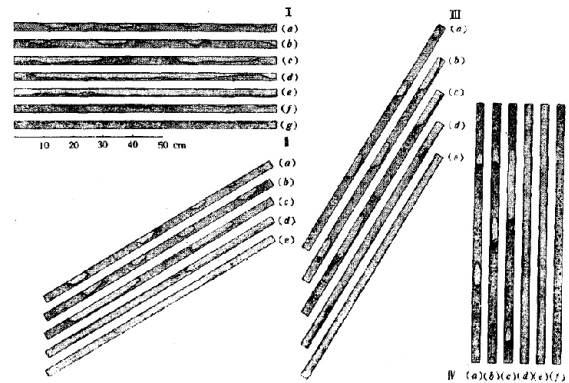


図 19 水平, 傾斜, 垂直の各管路における流動様式[28]

ボイラの水管配置には垂直のみならず水平や傾斜部分も少なからず存在する. 燃焼室周りを弦巻式に蒸発管を配置することも行われている. 気液二相流は密度の大きく異なる 2 相からなっていることから, 流れの構造も重力の影響を大きく受けることは容易に想像できる. 赤川らはそのような

考えからか、水平から垂直まで変化が可能な空気水系実験装置を作成し、そこでの二相流特性、特に相対速度並びに摩擦損失特性[28]を実験的に求めた。その装置を図 18 に、観察された流動様式のスケッチを図 19 に示す。同じ頃に東大では植田辰洋が垂直管での圧力損失、ボイド率に関する実験を行っている[29]。この当時のボイド率測定（相対速度の同定）には図 18 にも描かれているが、管路の 2 箇所遮断弁を取り付け、急速に遮断することによっていた。そのようにして得られるボイド率を予測する理論モデルの検討がなされた。ただし流れを 1 次元とし、時空間平均特性としてのボイド率であり圧力損失である。このことは Martinelli などと同様であった。そのようなボイド率を求めるための基本的な理論を展開した事例を次に示しておこう。

まず GE の Levy は気液間で運動量交換が行われるとしたいいわゆる Momentum exchange model [30] を提案した。詳細は Levy の論文を参照いただくとして、ここではその概略だけ紹介しておこう。

気液二相それぞれの運動方程式は

$$dp + \rho_L V_L dV_L = \left(\frac{dp}{dy} \right)_{LTP} - \rho_L g(\sin \theta) dy$$

$$dp + \frac{1}{A_G} d(A_G \rho_G V_G^2) + \frac{V_L}{A_G} d(A_L \rho_L V_L) = \left(\frac{dp}{dy} \right)_{GTP} dy - \rho_G g(\sin \theta) dy$$

この 2 式から圧力項を消去して変形すると

$$\frac{G^2}{\rho_L} d \left[\frac{(1-x)^2}{1-\alpha} + \frac{x^2 \rho_L}{\alpha \rho_G} - \frac{1}{2} \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)^2} \right] = \alpha \left[\left(\frac{dp}{dy} \right)_{GTP} - \left(\frac{dp}{dy} \right)_{LTP} + (\rho_L - \rho_G) \sin \theta \right] dy$$

ここで摩擦項と重力項を合わせて

$$\left(\frac{d\psi}{dy} \right)_{GTP} = \left(\frac{dp}{dy} \right)_{GTP} - \rho_G g \sin \theta$$

$$\left(\frac{d\psi}{dy} \right)_{LTP} = \left(\frac{dp}{dy} \right)_{LTP} - \rho_L g \sin \theta$$

とおくと

$$\frac{G^2}{\rho_L} d \left[\frac{(1-x)^2}{1-\alpha} + \frac{x^2 \rho_L}{\alpha \rho_G} - \frac{1}{2} \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)^2} \right] = \alpha \left[\left(\frac{d\psi}{dy} \right)_{GTP} - \left(\frac{d\psi}{dy} \right)_{LTP} \right] dy$$

いまもしクオリティ、ボイド率、密度が一定あるいは変化するとしても非常に緩やかに少しだけ変化すると仮定すれば、左辺は近似的に 0 となり、結果的に

$$\left(\frac{d\psi}{dy} \right)_{GTP} = \left(\frac{d\psi}{dy} \right)_{LTP}$$

これが Levy のいう Momentum exchange model の基礎となっている。これが成立すれば、

$$\frac{d}{dx} \left[\frac{(1-x)^2}{1-\alpha} + \frac{x^2 \rho_L}{\alpha \rho_G} - \frac{1}{2} \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)^2} \right] = 0$$

クオリティ x が 0 の時、ボイド率 α も 0 とすれば

$$\frac{(1-x)^2}{1-\alpha} + \frac{x^2 \rho_L}{\alpha \rho_G} - \frac{1}{2} \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)^2} = 0$$

これで解析的にボイド率がクオリティと関係づけられたことになる。

$$x = \frac{\alpha(1-2\alpha) + \alpha \sqrt{(1-2\alpha)^2 + \alpha \left[2 \frac{\rho_L}{\rho_G} (1-\alpha)^2 + \alpha(1-2\alpha) \right]}}{2 \frac{\rho_L}{\rho_G} (1-\alpha)^2 + \alpha(1-2\alpha)}$$

なおのちに Levy は混合長モデルを用いて断面内速度分布を考慮したモデルを構築している。

先の Levy の論文と同じ年に世古口は 1 次元のエネルギー式を用いて、消費エネルギー最小の原則からボイド率を定式化した論文を報告した[31]。これも Levy と同様に 1 次元の場の方程式に基づくものであり、我が国においても基本的に同様なアプローチがなされていたことは注目に値する。世古口は二相流では単相流で顕在化する摩擦損失に加えて、気相のかく乱によるエネルギー損失があると考えた。二相流のエネルギー式は

$$dp + \rho_m g dh + \alpha \frac{1}{2} \rho_m w_m^2 + \left(\frac{\lambda_m}{2Dg} w_m^2 + \zeta \sigma \right) \rho_m g dl = 0$$

ここで $p, \rho_m, h, w_m, \lambda_m, D, l, \alpha, \sigma, \zeta$ はそれぞれ圧力、二相流の平均密度、管路の高さ、平均流

速, 管摩擦係数, 管内径, 管長, 加速損失修正係数, 圧力脈動として顕在化する二相流における乱れによるエネルギー損失 (圧力損失) に対応する無次元数, 実験で求められる修正係数である. 平均密度, 平均流速, 動粘性係, 管摩擦係数はレイノルズ数準拠の单相流摩擦係数として次のように与える.

$$\rho_m = f_G \rho_G + f_L \rho_L, w_m \rho_m = w_{L0} \rho_L + w_{G0} \rho_G,$$

$$w_m = \frac{j_{L0} \rho_L + j_{G0} \rho_G}{f_L \rho_L + f_G \rho_G}, v_m = \frac{f_L \rho_L v_L + f_G \rho_G v_G}{\rho_m},$$

$$\lambda_m = a \text{Re}_m^n = a \left(\frac{D w_m}{v_m} \right)^n$$

次元解析と実験との比較から, 水平流に対して全圧力損失, 脈動損失, 相対速度はそれぞれ

$$\frac{\Delta p}{\rho_m g \Delta L} = \frac{\lambda_m}{2gD} w_m^2 + \frac{\Delta p_p}{\rho_m g \Delta L} = \frac{\lambda_m}{2gD} w_m^2 + 0.055 \sigma_h$$

$$\frac{\Delta p_p}{\rho_m g \Delta L} = 0.055 \sigma_H = 0.055 \frac{v_L^{0.15} j_{L0}^{0.75} w_r^{1.40}}{g^{1.15} D^{1.40}}$$

$$w_r = \frac{j_{G0}}{f_G} - \frac{j_{L0}}{f_L}$$

垂直流では

$$\frac{\Delta p}{\rho_m g \Delta L} = \frac{\Delta p_f}{\rho_m g \Delta L} + \frac{\Delta p_p}{\rho_m g \Delta L} = \frac{\lambda_m}{2gD} w_m^2 + 0.015 \sigma_h$$

$$\frac{\Delta p_p}{\rho_m g \Delta L} = 0.015 \sigma_v = 0.015 \frac{j_{L0}^{0.7} w_r^{1.30}}{gD}$$

エネルギー損失は

$$E_T = E_f + E_p = (\Delta p_f + \Delta p_p) F w_m$$

で与えられる. ここで気液二相流は全散逸エネルギーが気体体積率について最小になるようになる. つまり

$$\frac{dE_T}{df_L} = \frac{dE_f}{df_L} + \frac{dE_p}{df_L} = 0$$

の関係から水平管, 垂直管それぞれ

$$F_1 = 0.154 \sigma_H, F_1 = 0.039 \sigma_v$$

ここで

$$F_1 = \frac{(2-n)}{gD} \lambda_m \frac{j_{L0} w_r}{f_L \left(\frac{j_{G0} f_L^2}{j_{L0} f_G^2} + 1 \right)}$$

図 20 にこのようにしてもとめたホールドアップ

f_L の実験結果との比較を示している. 世古口モデルは次元解析的な部分も含むが, 脈動損失の定式化を行い, ボイド率を損失エネルギーとの関連で求めた最初の研究と位置付けられる. その点で非常に貴重な研究であると思うが, 残念ながら機械学会関西支部第 35 期定時総会講演会の前刷り [32] 以外には公表されていないようである.

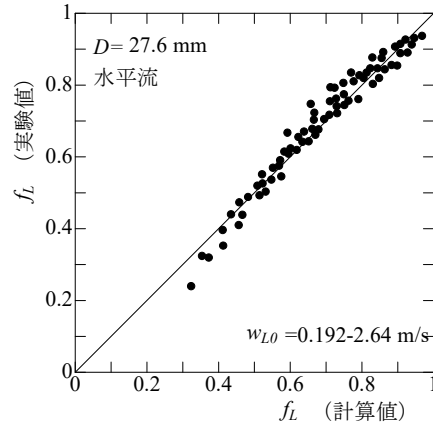


図 20 世古口によるホールドアップの実験値と計算値の比較[31]

同様な考え方でボイド率の定式化を行ったものに Zivi の Principle of minimum entropy production (1964) [33]がある. 摩擦による壁面での散逸エネルギーと運動エネルギーの和が最小となるとの考え方である. また環状噴霧流において液滴を含む気相の速度ヘッドと液膜の速度ヘッドが等しいとの考え方に基づいて, Smith はボイド率の推算式を提案した[34].

さて, 断面内には気泡流であれ環状流であれ, 速度分布とボイド率分布が存在する. そのような分布を考慮して, ボイド率の定式化を行ったのが Bankoff の Variable density model [35]である. Bankoff は速度分布とボイド率分布を

$$u_y / u_m = (y/R)^{1/m}, \alpha_y / \alpha_m = (y/R)^{1/n}$$

ここで $u_y, u_m, \alpha_y, \alpha_m, y, R$ はそれぞれ壁から y の位置における二相混合物の速度, 断面中心での速度, y の位置でのボイド率, 中心でのボイド率, 壁からの距離, 管半径である. これらを用いて平均ボイド率を求めた結果が

$$\bar{\alpha} = K \frac{j_G}{j_G + j_L}, K = \frac{2(m+n+mn)(m+n+2mn)}{(n+1)(2n+1)(m+1)(2m+1)}$$

で与えられるとした. 速度とボイド率に断面内分

布を与えた最初のモデルであろう。

この Bankoff のモデルをさらに一般化したのが Zuber & Findlay の Drift-flux model[36]である。Zuber らは局所の気相速度を $v_G = j + V_{Gj}$ とおき、混合物の体積中心速度とドリフト速度の和とした。これにボイド率をかけて

$$j_G = \alpha v_G = \alpha j + \alpha V_{Gj}$$

断面平均をとると

$$\langle j_G \rangle = \langle \alpha v_G \rangle = \langle \alpha j \rangle + \langle \alpha V_{Gj} \rangle = \frac{Q_G}{A}$$

ここでボイド率分布とそこでの体積流束をかけて平均をとったものが実際の流れを表す、分布を考慮した流れの特性値になると考えるのである。

$$\begin{aligned} \frac{j_G}{v_G} &= \frac{\langle \alpha v_G \rangle}{\langle \alpha \rangle} = \frac{\langle j_G \rangle}{\langle \alpha \rangle} = \frac{\langle \alpha j \rangle}{\langle \alpha \rangle} + \frac{\langle \alpha V_{Gj} \rangle}{\langle \alpha \rangle} \\ &= \frac{\langle j_G \rangle}{\langle \alpha \rangle} = \frac{\langle \alpha j \rangle \langle j \rangle}{\langle \alpha \rangle \langle j \rangle} + \frac{\langle \alpha V_{Gj} \rangle}{\langle \alpha \rangle} \end{aligned}$$

ここで右辺第 1 項中の $\frac{\langle \alpha j \rangle}{\langle \alpha \rangle \langle j \rangle} = C_0$ とし、これを

Distribution parameter と呼んでいる。この時

$$\frac{\langle j_G \rangle}{\langle \alpha \rangle} = C_0 \langle j \rangle + \frac{\langle \alpha V_{Gj} \rangle}{\langle \alpha \rangle}$$

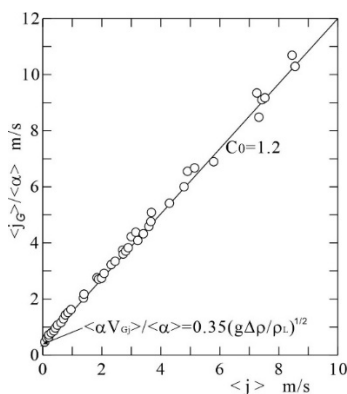


図 21 Drift-flux model によるボイド率の相関[36]

図 21 はこのようにして整理されたボイド率の実験結果で、直線の傾きが C_0 、 y 軸の切片がボイド率で重み付けしたドリフト速度(上式右辺第 2 項)に該当する。さらに重要なのは質量保存の式にこの Drift-flux model を適用し、

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + C_K \frac{\partial \alpha}{\partial z} = 0, C_K = j + V_{Gj} + \alpha \frac{\partial V_{Gj}}{\partial \alpha}$$

で表されるボイド伝播方程式を誘導し、ボイド波が Kinematic wave の速度で伝播することを示したのである。ボイド波つまりは運動学的密度波である。これがのちに述べる密度波振動のメカニズムを考えるうえで重要な役割を果たす。

我が国で貫流ボイラの商用機が出現したのが 1962 年であるが、海外ではそれに先立って 1926 年に Siemens-Schuckertn Werke に Benson ボイラが建設され、1957 年には CE 製 Sulzer mono-tube ボイラが運開、1959 年には Eddystone 1 号機が運開している。そのような時代背景を受けて、石谷と赤川も世界と将来の動向を読み解き、貫流ボイラに関する研究を開始した。そして 1955 年には蒸発量分布、圧力分布の計算法を提示している[37]。

貫流ボイラでは出力当たり保有水量が自然循環ボイラなどドラム式に比べてかなり小さい。すなわち各種の外乱に対して圧力や温度が敏感に反応する。逆に言えばボイラの制御が欠かせないのである。貫流ボイラの開発過程でこの問題について多くの研究が行われたのは当然で、それらについては次節において流動の安定性に関する議論をまず行い、そのあとで動特性やボイラの制御に関する説明を行う。

7. 流動の安定性と二相流ダイナミクス

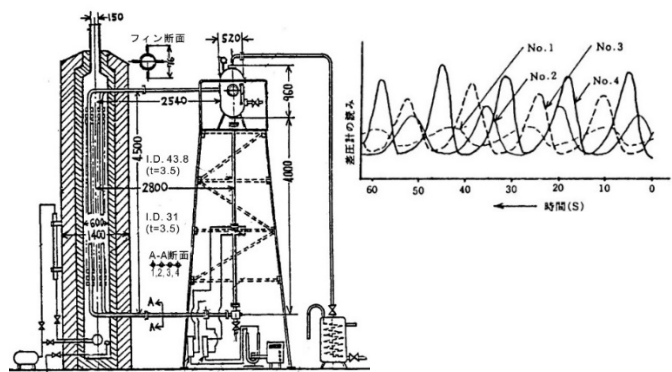


図 22 自然循環実験装置と脈動波形[38]

赤川らは自然循環ボイラの水循環研究の一環として、図 22 に示す 4 本並列管の自然循環実験装置を製作した[38]。実験装置は蒸気ドラムと水分配ヘッドからなり、蒸気管長さ 4.9 m の装置であった。この装置を用いて実験を行ったところ管 1 と

2で逆位相, 管3と4で逆位相. 1と3で90°程度の位相のずれ, 結果的に4本が90°ずつ位相のずれた脈動が発生した. このような位相のずれは様々な様相を示す. たとえば4本の場合, 2本ずつが組になり, それらが180°位相のずれたものも発生する. 並列管の本数が増えるとますます多様なモードの振動が発生し, その結果, ヘッド間差圧は一定という境界条件を与えることになる[39], これが密度波振動の解析でヘッド間差圧一定のもとで1本について解析すれば, 多数並列管での脈動解析に対応するという考えにつながる.

実用ボイラでの脈動の記録は石谷の著書[25]にも記載されている. 図23に示す低負荷時の脈動は気泡の発生のたびごとに循環が間欠的に発生した結果であり, 高負荷時の脈動は降水管の流量変動はない状態のもとで並列管間において密度波振動が発生したものである.

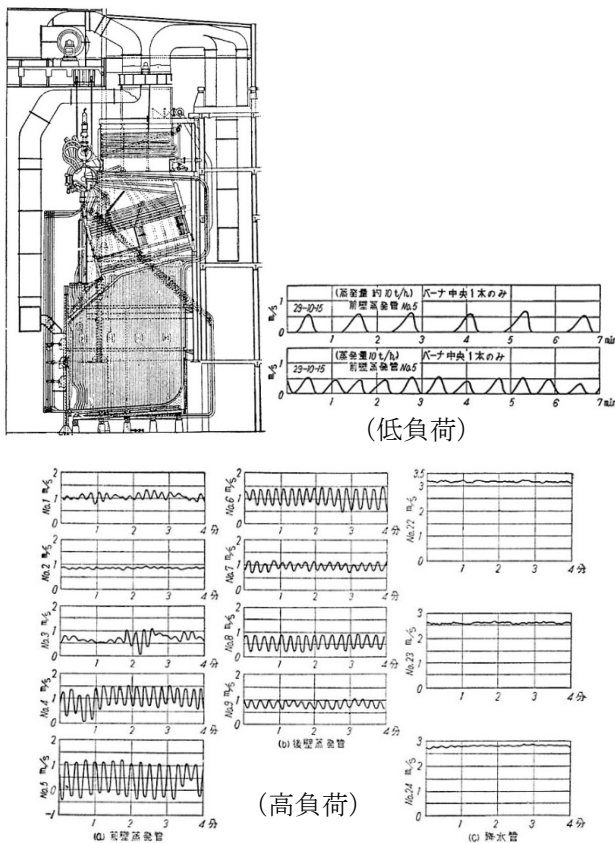


図23 名古屋発電所 Babcock & Wilcox CTM ボイラ (110t/h, 2.41MPaG, 390°C)における流動脈動 [25]

不安定流動については海外ではボイラに対する問題もさることながら BWR において特に重要であった. わが国でも 1960 年当初には早くも葉山[40]や寺野[41]が BWR の水力学的不安定について検討をおこない, Currin[42]や Jones[43]による流動不安定解析コードが公表されている. また Wallis & Heasley [44]はラグランジュモデルを用いて流動安定性の極めて明晰な解析を行っている. これは解析的アプローチの一つの典型とみることができる.

このような流動安定性問題は自然循環系のみならず貫流ボイラあるいは貫流型蒸気発生器などでも大きな問題となり, 二相流ダイナミクス研究としての大きな流れが形成された. その典型は 1967 年に開催された EURATOM 主催の Symposium on Two-Phase Flow Dynamics [45]である. 残念ながらこの会議には日本からの発表は全くなく, 彼我の実力差を見せつけられる結果になったと思う. 著者も 5 年ほど遅れて, この時の Proceedings の青焼き版を読んだ.

このシンポジウムでは二相流の不安定流動, 圧力波伝播など二相流のダイナミクス全般が議論され, 現在においても内容に古びた感じがしない. その意味で二相流ダイナミクスの原典ともいえる. その後不安定流動に関しては DYNAM コード[46]が開発されたが, いずれも分布定数系の微分方程式 (質量, エネルギー, 運動量) の定常状態からの微小変動を考え, 方程式を線形化し, ラプラス変換を施し, 周波数領域で安定性を評価するものが大部分であった. 表4に当時の代表的な安定解析コードを示しておこう.

話が前後するが, 二相流系の不安定流動の分類が Bouré らによって報告された[47]のちには, その分類を指標にして研究が行われるようになった. 表5は Bouré らの分類に準拠しながらもより簡便な形にまとめなおしたものである.

若干さかのぼるが, 赤川らも貫流ボイラを念頭に不安定流動に関する実験を行っていた[48]. 同実験のテスト部を図24に示す. コイル状に蒸発管を巻き, 高さを押さえて長さを大きく, すなわち位置損失を小さく押さえて摩擦損失が支配的になるように設計されている. 動的挙動を考えると, 位置損失と摩擦損失は異なった位相特性を有しており, 問題を単純化したいという考えと, Sulzer

表 4 安定解析コード

| Code or Authors | Heat flux | Heater dynamics | Subcooled boiling | Two-phase model | Superheated region | Nuclear feedback |
|--|-----------------------------------|-----------------|-------------------|--|--------------------|------------------|
| <u>線形解析/周波数領域</u> | | | | | | |
| LOOP code (Davis & Potter 1967) | Uniform | No | No | Homogeneous model | Included | No |
| NUFREQ code Lahey & Yadigarogly 1973) | Arbitrary in SR, uniform in BR | No | No | Homogeneous model | No | Considered |
| Saha (1974) | Uniform | Considered | Considered | Drift-flux model | No | No |
| Nakanishi, Ozawa et al.(1978) | Uniform | No | No | Drift-flux model, homogeneous model if superheated region exists | Included | No |
| STABLE code (Jones 1961) | Arbitrary | Considered | Considered | Slip-flow model | No | No |
| DYNAM code (Efferding 1968) | Arbitrary | Considered | Considered | Slip-flow model | Included | No |
| <u>時間領域非線形解析</u> | | | | | | |
| HYDNA code (Currin et al. 1961) | Arbitrary | Considered | Considered | Slip-flow model | Included | No |
| DEW code (Takitani & Sakano 1979) | Uniform or Heat exchange mode | Considered | No | Slip-flow model | Included | No |

*SR: single phase liquid region, BR: boiling two-phase flow region

表 5 沸騰二相流系における機構論的分類

| Category | Pattern | Mechanism | Feature |
|-------------------------------------|---|--|--|
| Negative resistance instability | Flow excursion or Ledinegg instability | Negative damping in first-order system | Transitional, significant flow mal-distribution appears in parallel-channel system |
| | Pressure drop oscillation | Dynamic interaction between flow excursion and accumulation mechanism of mass and momentum | Relaxation oscillation with large amplitude and long period |
| Time-delayed feedback instability | Density wave oscillation | Propagation delay of void wave and feedback effect provide negative damping | Oscillation, period comparable with residence time, appears in positive resistance region of pressure drop vs. flow rate |
| Thermal non-equilibrium instability | Geysering | Insufficient nucleation sites bring about large superheat followed by violent boiling | Relaxation oscillation if liquid refilling mechanism exists |

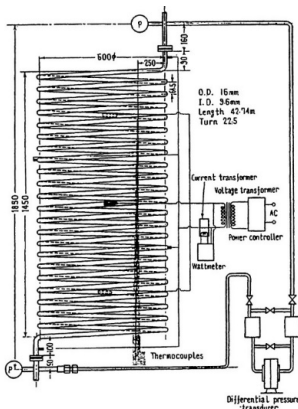


図 24 赤川の強制貫流蒸発管実験装置 (1965年頃) [48]

mono-tube ボイラなどでは蒸発管長さが 400 m にも達する場合があることに配慮したものであろう。貫流ボイラは、ドラム式などに比較して蒸発量当たりの保有水量が小さい。ボイラの動特性は保有水量の有する熱エネルギーの動特性と長大な管路での通過時間（滞留時間）が極めて重要な役割を果たす。そのようなボイラの動特性について体系的に述べた書籍は Th. Stein[49], のちに P. Profos [50]によるものが代表的であろう。わが国でも寺野と竹内による『ボイラの自動制御』[51]が発行されたのが 1969 年であった。Profos は動特性を図式解法によって見事に説明したが、古典制御理論

に基づいてボイラの動特性を分布定数系解析も含めて包括的に議論した寺野の研究も非常に重要である。寺野は、1957年という世界的にみてもかなり初期の段階で、貫流ボイラの動特性を分布定数系モデルに従って解析した[52]。1次元の質量、熱エネルギーの式において、定常値からの微小変動を考へることにより線形し、ラプラス変換を用いて解析、その後、逆変換して動特性を定式化した。1963年には世古口らが解析的研究を報告している[53]。動特性実験や解析に関してはボイラ製造の重工各社が行っており、1960年代に多くの論文が公表された。

8. 統計的特性

赤川らは1960年代初頭、垂直管で図25に示すボイド率変動を計測した[54]。スラグ流やチャーン流ではボイド率が大きく変動する。つまりは大気泡が交互に通過すること、あるいは大気泡が大きく乱れてその変動が顕在化することなどからも容易に理解できる。それに伴って差圧も大きく変動する。赤川はこのようなボイド率変動を特徴づけるパラメータを明らかにすることによって二相流の本来的に持つ変動特性が明らかにできると考えた。

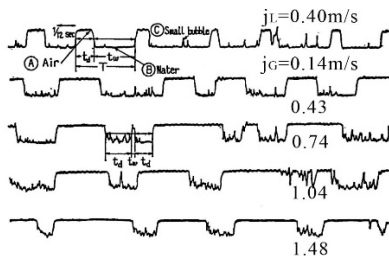


図25 赤川によるボイド率変動特性[54]

スラグ流に限らず二相流の変動特性を明らかにすることによって流動様式を同定することも可能になる。Jones & Zuber [55] はボイド率の変動特性と流動様式の関係性を明らかにし、とくにスラグ流やチャーン流では低ボイド率と高ボイド率の2か所にピークを持つ分布となることを明らかにした。のちに著者らは離散気泡モデルを用いて1次元流れのボイド伝播方程式と運動量の関係式を用いてそのボイド率変動パターンから流動様式の同定を行い、また圧力損失もほぼ予測できることを明らかにしている[56,57]。つまりはボイド率変動と圧

力損失は密接に関係していることの傍証でもある。この赤川の研究はのちにスラグ流の差圧変動の研究[58]へと発展した。

一方、西川、世古口、深野らは二相流の静圧変動特性について丹念な研究を行った[59]。その一例を図26に示しておこう。この研究はかつて世古口が提唱したモデルから発した二相流の本質を変動特性と見たことに端を発したものであろう。最終的にこの研究は深野の学位論文[60]につながったのである。

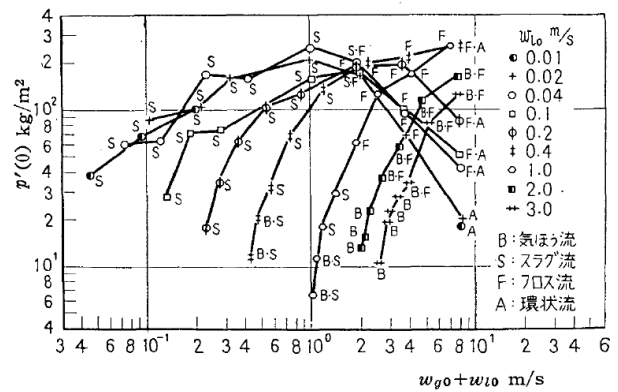


図26 西川、世古口、深野らの二相流の静圧変動特性[59]

これらはいずれも二相流の1次元特性であって、局所的な流れの特性が断面内で積分され、これが時間変動を伴う管長方向に積分された結果である。このような二相流の変動特性の研究は Jones & Zuber のように統計的な分析に供するか、あるいは個々の気泡の挙動を解明することによって変動の機構を明らかにする方向に向かうかに分かれる。前者のほうはボイド率あるいは差圧変動の計測によって内部が可視化できない管路であっても流動予測がある程度できることになる。後者のほうは流れの3D的特性を含む詳細機構に関するより分析的な研究に発展していくのである。

9. 流れの詳細機構

流れの詳細機構の代表的な研究として、環状流を主対象とした Hewitt らの研究は重要である。環状流はボイラや蒸気発生器において最も中心的な流れの形態であり、その液膜厚さや液滴の分布、量などが伝熱特性に大きく影響するからである。彼らの著書[61]に掲載されたデータを図27に示し

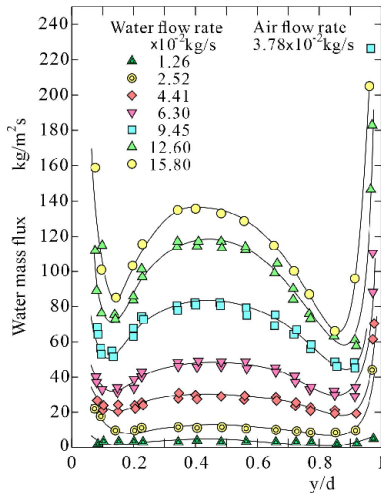


図 27 環状流における液相の質量流束 (データは[61]による)

ておこう。

我が国では世古口が中心となって環状流の液膜厚さや液滴分布が計測された。図 28 はその一例で、環状流における液膜の時間存在割合[62]を示している。また図 29 は環状流域での伝熱やドライアウトに関連し重要な特性である断面内液滴分布の測定結果[63]である。

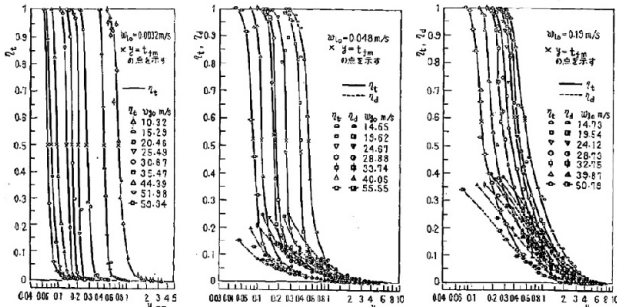


図 28 環状液膜の時間的存在割合[62]

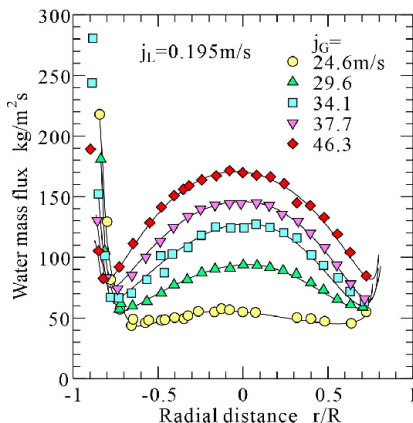


図 29 液滴流量の断面内分布 (データは[63]による)

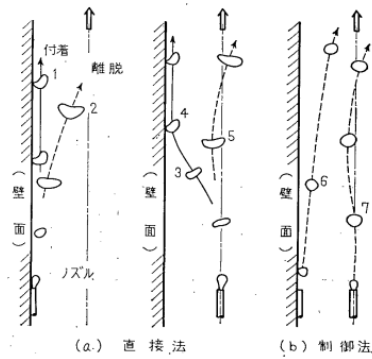


図 30 気泡発生後の挙動[64]

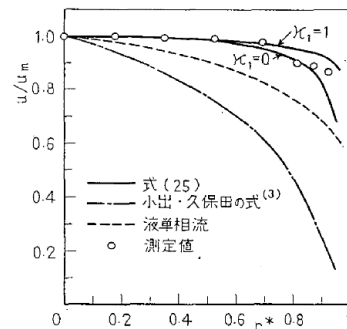


図 31 垂直管内気泡流中の液速度[66]

世古口と佐藤は気泡流の詳細機構について報告した[64-66]。図 30 のスケッチは単純にノズルから気泡を発生させた場合と、気泡形状、サイズを制御して導入した場合とで発生直後の気泡の挙動が異なることを示している。気泡の形状と流れとの干渉によって気泡の断面内移動や結果的にボイド率が影響されることを端的に示した。さらに佐藤らは液相中の乱流による応力と気泡運動による攪乱による応力に分けて議論を展開し、流体力学的手法を導入してボイド率分布と液速度分布を関連付け、気泡流の基本的な構造を定式化した。この段階でボイド率分布や速度分布が完全に解けたわけではないが、相互関係を明確にした点において先駆的な研究であった。図 31 は結果の一例で、気泡流中の液速度分布の実験結果と計算結果の比較が行われている。これらの結果を含んだ佐藤の学位論文[65]が 1974 年に提出され、くしくも同じ年に Serizawa も気泡流のボイド率分布に関する成果を学位論文[67]として提出している。図 32 は気泡流からスラグ流に至る範囲で断面内ボイド率分布を求めた結果である。丹念な実験によって気泡流域では Wall peak のデータが示されている。これらの研究を契機として特に気泡流域においてはその

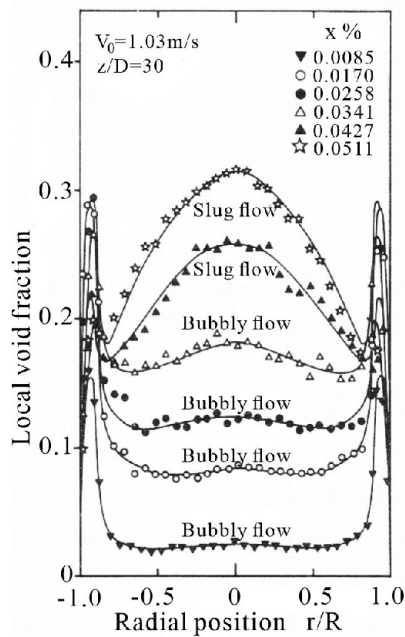


図 32 断面内ボイド率分布[67]

乱流構造の計測やモデル化が進行し、詳細構造の一側面が明らかになった。なおスラグ流域では当然ながら Center peak の分布になるが、これは時間平均値であり、実際には先に示したように大きな変動を伴っており、時空間にわたって変動するボイド分布を 2 次元平面上で議論するのは難しいと言わざるを得ない。そのような大変動や複雑な乱流構造、局所非定常性があっても時空間平均値があれば十分に役立つ場合も多くある。逆に変動そのものが問題となる場合にはその限りではない。

10. 気液二相流研究会、シンポジウムなど

気液二相流研究は大阪大学を中心として始まったが、その流れを受けて日本機械学会関西支部には相互の情報交換、海外の状況報告、既存のデータの評価などを目的として 1960.5.16 主査:菅原菅雄、幹事:石谷清幹、田伏敬三、佐藤俊、赤川浩爾として二相流研究分科会が設置された。その後 1967 年から 1973 年までは特に学会に依拠しない形での二相流研究会、1973 年から 1975 年は再び機械学会の下で二相流ダイナミクスに関する研究分科会 (2P-SC26)、1977 年機械学会関西支部気液二相流に関する研究懇話会、1981 年機械学会気液二相流に関する調査研究分科会、2001 年には気液二相流技術・調査検討懇話会、2007 年機械学会関西支部気液二相流技術懇話会と切れ目なく継続

的に活動した。その活動の成果として、1977 年には『気液二相流のダイナミクスに関する研究』[68]、1989 年には『気液二相流技術ハンドブック』[69] (コロナ社)、2006 年にその改訂版である『改訂 気液二相流技術ハンドブック』[70]を上梓した。また 1980 年には関西支部シンポジウム「気液二相流」を開催し、広く全国から研究者が集結し、講演件数は 28 件であった。これはのちに 1981 (27 件)、1982 (30 件)、1983 (23 件)、1985 (33 件)、1986 年 (29 件) の合計 6 回開催された。二相流研究会、研究懇話会で活動したメンバーの一部は、同時並行的に学術会議水力学水理学研究連絡委員会に設置された混相流小委員会の重要メンバーとして混相流シンポジウムの開催 (1982 年第 1 回、以降毎年継続的に 1986 年第 5 回まで実施) に尽力した。その活動は混相流学会設立 (1987 年) の前年まで継続した。また 1979 年には日米科学協力事業の一環として「二相流ダイナミクスに関する日米セミナー」(日本側代表: 石谷清幹、米国側代表: A. E. Bergles) を開催し、米国から A. E. Bergles, S. G. Bankoff, J. Weisman, R. T. Lahey, Jr., O. C. Jones, G. Yadigaroglu の 6 名、国内から約 40 名の研究者が参加した。そこで議論された内容は 2 年後の 1981 年に “Two-Phase Flow Dynamics” [71] として出版された。このシリーズの日米セミナーはその後も日米交互に定期的で開催されている。

11. 終わりに

第 2 次世界大戦後、我が国の産業復興には電力システムの再構築が不可欠であり、水管ボイラ、すなわち自然循環ボイラが国内技術はもちろん先進的な海外技術の導入によって盛んに建設された。海外技術であっても自ら設計建設できる能力確保のためには、水循環の設計基準が必要で、そのような観点で我が国においても気液二相流研究が開始された。石谷や赤川の努力によって、二相流研究に基づいた水循環設計手法が確立されたが、その当時、米国などではすでに BWR や PWR 開発が進行しており、そのために気液二相流研究は急速に増加していた。わが国の二相流研究はそのような世界の情勢から若干おくれた面もあったが、逆に先進的な面もあったのは間違いない。本稿はそのような気液二相流研究の発端から創成期、さらには応用研究も含めた発展期の状況について、

1980年初頭までの範囲で振り返った。二相流研究は時空間平均特性、二相流の変動の統計的特性把握、さらに流れの詳細な機構へと順次研究が進化していった。同時にシステムとしてのダイナミクス、不安定流動やボイラの動特性、原子炉の熱水力ダイナミクスなどの研究が展開された。1970年半ばには Ishii などによって二流体モデルの基本的枠組みが構築され[72]、TRAC などのように大規模な熱水力評価コードが開発された[73]。その後、様々な計測手段の開発と進化、モデルの深化と計算機の能力の飛躍的向上によって二相流の詳細な機構が解明され続けている。

参考文献

- [1] Münzinger, F., Untersuchungen an Steilrohrkesseln - Der Wasserumlauf in Steilrohrkesseln, VDI Zeitschrift, Band 64, Nr. 25 (1920), s. 453-457.
- [2] Münzinger, F., Dampfkraft, Verlag von Julius Springer, Berlin (2. Aufl. 1933, 3. Aufl. 1949).
- [3] Schmidt, E., Der Wasserumlauf in Steilrohrkesseln, Festschrift "Fünfundzwanzig Jahre Technische Hochschule Danzig", Verlag Kafemann, Danzig (1929), s.231-250.
- [4] Forschungsheft 365 - Beilage zu Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens - Wasserumlauf in Dampfkesseln, VDI-Verlag (1934).
本論文集には Ernst Schmidt, Ähnlichkeitstheorie der Bewegung von Flüssigkeitsgasgemischen, s.1-3, Philipp Behringer, Steiggeschwindigkeit von Dampfblasen in Kesselrohren, s. 84-12 および Wolfgang Schurig, Wasserumlauf in Dampfkesseln und Bewegung von Flüssigkeitsgasgemischen in Rohren, s.13-23 が含まれている。
- [5] 電気事業講座編集委員会編, 電気事業発達史, エネルギーフォーラム (2007).
- [6] 電力政策研究会編, 電気事業法制史, 電力新報社 (1985).
- [7] 資源エネルギー庁, エネルギー白書, 各年度.
- [8] 山口歩, 1890~1930 の日本の火力発電所ボイラー市場を Babcock & Wilcox 社が独占した過程とその技術的理由, 科学史研究 II, Vol. 31, No. 181 (1992), pp. 9-18.
- [9] 松本壽, III. 蒸気罐 蒸気機関 蒸気タービン復水器國産蒸気タービン發電機装置並に水管式汽罐装置について, 機械學會誌, Vol. 34, No. 166 (1931), pp. 188-211.
- [10] 山崎喜一郎, 汽罐燃料の選擇, 汽罐研究, Vol. 1, No. 1 (1935), pp. 36-46.
- [11] 寺本憲宗, ボイラ技術の系統化調査, 国立科学博物館 (2007).
- [12] 宇治田惣次, 玉井幸久, ボイラ技術の歩み, 火力原子力発電, Vol. 31, No. 12 (1980), pp. 1315-1367.
- [13] 石谷清幹, 赤川浩爾, ボイラの水循環, コロナ社(1953), 訂正増補版(1959).
- [14] 石谷清幹, 赤川浩爾, ボイラの自然循環, 研究と設計の現状通論と無次元特性数の提案, 機械学会誌, Vol. 58, No. 439 (1955), pp. 587-592.
- [15] Martinelli, R. C., Putnam, J. A., Lockhart, R. W., Two-Phase, Two-Component Flow in the Viscous Region, Trans. American Instn. Chem. Engrs., Vol. 42 (1946), pp. 681-705.
- [16] Martinelli, R. C., Nelson, D. B., Prediction of Pressure Drop during Forced-Circulation Boiling of Water, Trans. ASME, Vol. 7(1948), pp. 695-702.
- [17] Lockhart, R. W., Martinelli, R. C., Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes, Chem. Eng. Progress, Vol. 45, No. 1 (1949), pp. 39-48.
- [18] Chisholm, D., Laird, A. D. K., Two-Phase Flow in Rough Tubes, Trans. ASME, Vol. 80, No. 2 (1958), pp. 276-286.
- [19] 石谷清幹, 赤川浩爾, 武田克巳, 永田和彦, 気水混合物の流動, 第1報 流動の様式と相対速度, 機論, Vol. 18, No. 72 (1952), pp. 31-18.
- [20] 赤川浩爾, 気液二相流の研究の展望, 機械学会誌, Vol. 63, No. 495 (1960), pp. 559-567
- [21] Collier, J. G., Convective Boiling and Condensation, McGraw-Hill, Maidenhead (1972).
- [22] Baker, O., Simultaneous Flow of Oil and Gas, Oil & Gas J., Vol. 53 (1954), pp. 185-190.
- [23] Mishima, K., Ishii, M., Flow Regime Transition Criteria for Upward Two-Phase Flow in Vertical Tubes, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, No. 5 (1984), pp. 723-737.
- [24] Taitel, A., Barnea, D., Dukler, A. E., Modeling Flow Pattern Transitions for Steady Upward

- Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes, *AIChE J.*, Vol. 26, No. 3 (1980), pp. 345-354.
- [25] 石谷清幹, 蒸気原動機 II, 山海堂 (1957) (ボイラ要論, 1961).
- [26] Kramer, A. W., *Boiling Water Reactors*, Addison-Wesley Pub., Reading (1958), pp. 45-131.
- [27] Gouse, Jr., S. W., *An Index to the Two-Phase Gas-Liquid Flow Literature*, MIT Press, Cambridge (1966).
- [28] 赤川浩爾, 気水混合物の流動 (第 2 報, 水平管および傾斜管上向流における相対速度; 第 3 報, 水平管および傾斜管上向流における摩擦損失), *機論 (第 2 部)*, Vol. 23, No. 128 (1957), pp. 285-291, pp. 292-298.
- [29] 植田辰洋, 気水混合流に関する研究 (垂直上昇管について), *機論 (第 2 部)*, Vol. 23, No. 132 (1957), pp. 553-558.
- [30] Levy, S., Steam Slip – Theoretical Prediction from Momentum Model, *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 82 (1960), pp. 113-124.
- [31] 世古口言彦, 気液二相流に関する研究, 大阪大学学位論文 (1960).
- [32] 石谷清幹, 世古口言彦, 藤原泰弘, 山本立, 気水二相流の脈動損失について, 機械学会関西支部第 35 期定時総会講演会 (1960), pp. 45-46.
- [33] Zivi, S. M., Estimation of Steady-State Void Fraction by Means of the Principle of Minimum Entropy Production, *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 86 (1964), pp. 247-252.
- [34] Smith, S. L., Void Fraction in Two-Phase Flow: A Correlation Based upon an Equal Velocity Head Model, *Proc. Instn. Mech. Engrs*, Vol. 186 Pt. 1, No. 36 (1969-70), pp. 647-664.
- [35] Bankoff, S. G., A Variable Density Single-Fluid Model for Two-Phase Flow with Particular Reference to Steam-Water Flow, *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 82 (1960), pp. 265-272.
- [36] Zuber, N., Findlay, J. A., Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow System, *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 87 (1965), pp. 453-468.
- [37] 石谷清幹, 赤川浩爾, 強制貫流蒸気管における流動の研究 (第 1 報 計算法, 第 2 報 計算法の適用例), *機論 (第 2 部)*, Vol. 21, No. 112 (1955), pp. 943-954.
- [38] 赤川浩爾, ほか 4 名, ボイラ水循環の実験 (第 2 報 循環の脈動), 機械学会関西支部第 36 期定時総会講演会 (1961), pp. 87-89.
- [39] Nakanishi, S., Ozawa, M., Ishigai, S., The Modes of Flow Oscillation in Multi-Channel Two-Phase Flow Systems, S. Kakac, M. Ishii eds, *Advances In Two-Phase Flow and Heat Transfer – Fundamentals and Applications*, Vol. II, Martinus Nijhoff Pub., Boston (1983), pp. 709-723.
- [40] 葉山真治, 動力用原子炉の動特性の研究, *KAP-No. 3 (1960-61); KAPNo. 4 (1961-62)*, 沸騰チャンネル内の水力学的不安定 (第 1 報), *機論*, Vol. 28, No. 195 (1962), pp. 1607-1614.
- [41] 寺野寿郎, 黒須顕二, 村山雄二郎, 奥村幸輝, 沸騰水型原子炉の水力学的不安定, 自動制御研究会配布資料 (1961); *機論 (第 2 部)*, Vol. 28, No. 195 (1962), pp. 1597-1605.
- [42] Currin, H. B., Hunin, C. M., Rivlin, L., Tong, L. S., HYDNA-Digital Computer Program for Hydrodynamic Transients in a Pressure Tube Reactor or a Closed Channel Core, CVNA-77, Westinghouse Electric (1961).
- [43] Jones, A. B., Hydrodynamic Stability of a Boiling Channel (SATBLE code), KAPL-2170, KAPL-2208 (1961), KAPL-2290 (1963), KAPL-3070 (1964).
- [44] Wallis, G. B., Heasley, J. H., Oscillation in Two-Phase Flow System, *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 83 (1961), pp. 363-369.
- [45] EURATOM, Symposium on Two Phase Flow Dynamics, Eindhoven (1967).
- [46] Efferding, L. E., DYNAM A Digital Computer Program for Study of the Dynamic Stability of Once-Through Boiling Flow with Steam Superheat, GAMD-8656, Gulf General Atomic (1968).
- [47] Bouré, J. A., Bergles, A. E., Tong, L. S., Review of Two-Phase Flow Instability, *ASME Paper 71-HT-42 (1971)*, *NED*, Vol.25 (1973), pp.165-192.
- [48] 赤川浩爾, 気液二相流研究史と関連技術—気液二相流研究史の私観, 学術出版印刷 (2007).

- [49] Stein, Th., *Regelung und Ausgleich in Dampfanlagen*, Verlag von Julius Springer, Berlin (1926).
- [50] Profos, P., *Die Regelung von Dampfanlagen*, Springer, Berlin (1962).
- [51] 寺野寿郎, 竹内元, ボイラの自動制御, オーム社 (1969)
- [52] 寺野寿郎, 強制貫流ボイラの過渡特性, 運輸技術研究所報告, Vol. 7, No. 10 (1957), pp. 207-251.
- [53] 世古口言彦, 逆井実, 強制流動ボイラにおける蒸発部圧力応答, 機論, Vol. 29, No. 206 (1963), pp. 1713-1724.
- [54] 赤川浩爾, 気液二相流のボイド率変動特性に関する研究 (第1報), 機論, Vol. 29, No. 201 (1963), pp. 924-931.
- [55] Jones, O. C., Zuber, N., The Interrelation between Void Fraction Fluctuations and Flow Pattern in Two-Phase Flow, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 2 (1975), pp. 273-306.
- [56] 伊藤浩二, 井上満, 小澤守, 庄司正弘, 気液二相流の流動様式の簡易遷移モデル, 機論 (B), Vol. 70, No. 689 (2004), 151-158.
- [57] 網健行, 梅川尚嗣, 小澤守, 庄司正弘, 離散気泡モデルによる二相流ダイナミクスの解明, *Thermal Science & Engineering*, Vol. 15, No. 4 (2007), pp. 197-209.
- [58] 赤川浩爾, 浜口八朗, 坂口忠司, 碓哲二, 気液二相スラグ流の差圧脈動に関する研究 (第1報-第3報), 機論 (第2部), Vol. 36, No. 289 (1970), pp. 1520-1542.
- [59] 西川兼康, 世古口言彦, 池田久志, 深野徹, 気液二相流の脈動現象に関する研究, 第1報 垂直上昇管内静圧変動を構成する2要素; 西川兼康, 世古口言彦, 深野徹, 第2報 垂直上昇管内静圧変動特性と流動様式との関係, 機論 (第2部), Vol. 35, No. 271 (1969), pp. 582-590; pp. 591-596.
- [60] 深野徹, 気液混合体の垂直上昇流における脈動現象に関する研究, 九州大学学位論文 (1971).
- [61] Hewitt, G. F., Hall-Taylor, N. S., *Annular Two-Phase Flow*, Pergamon Press, Oxford (1970).
- [62] 世古口言彦, 西川兼康, 中里見正夫, 西英俊, 金氏顕, 気液環状二相流の液膜に関する研究, 機論, Vol. 39, No. 317(1973), pp. 313-323.
- [63] 世古口言彦, 気液二相流一流動現象, 伝熱工学の進展 I, 養賢堂(1973), pp. 173-355.
- [64] 世古口言彦, 佐藤泰生, 本田達, 気泡流の研究 (第1報, 垂直上昇流における疎な気泡群について), 機論, Vol. 40, No. 333(1974), pp. 1395-1403.
- [65] 佐藤泰生, 気液二相流体の管内非整定流動に関する研究, 九州大学学位論文 (1974).
- [66] 佐藤泰生, 世古口言彦, 気泡流の液速度分布に関する研究, 機論 (第2部), Vol. 41, No. 351 (1975), pp. 3215-3223.
- [67] Serizawa, A., *Fluid-Dynamic Characteristics of Two-Phase Flow*, 京都大学学位論文 (1974); Serizawa, A., Kataoka, I., Michiyoshi, I., *Turbulent Structure of Air-Water Bubbly Flow – II, Local Properties*, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 2 (1975), pp. 235-246.
- [68] 気液二相流のダイナミクスに関する研究, 日本機械学会二相流のダイナミクスに関する研究分科会 (2P-SC26) 成果報告書, (1977).
- [69] 日本機械学会編, 気液二相流技術ハンドブック, コロナ社 (1989).
- [70] 日本機械学会編, 改訂 気液二相流技術ハンドブック, コロナ社 (2006).
- [71] Bergles, A. E., Ishigai, S. eds., *Two-Phase Flow Dynamics*, Hemisphere, New York (1981).
- [72] Ishii, M., *Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow*, Eyrolles, Paris (1975).
- [73] TRAC-PIA, *An Advanced Best-Estimate Computer Program for PWR LOCA Analysis; Safety Code Development Group*, Energy Division, Los Alamos Scientific Laboratory, NUREG/CR-0665, LA-7777-MS (1979)
- 図1, 図9, 表4中に記載の文献その他参考文献
- * The Babcock & Wilcox Co., *Steam-Its Generation and Use*, 22 ed., New York (1890).
 - * Watkinson, W. H., *Circulation in Water-Tube Boilers*, *Journal of the American Society for Naval Engineers*, Vol. 8, No. 3 (1896), pp. 489-500.
 - * Bellens, Ch., *Zeitschrift des Vereines deutscher*

- Ingenieure, Band 43, Nr. 52 (1899), s. 1637.
- * The Stirling Co., Stirling – A Book on Steam for Engineer, New York (1905).
 - * Gensch, M., Berechnung, Entwurf und Betrieb rationeller Kesselanlagen, Verlag von Julius Springer, Berlin (1913).
 - * Hoefler, K., Untersuchungen über Strömungsvorgänge im Steigrohr eines Druckluftwasserhebers, VDI Zeitschrift, Band 57, Nr. 30 (1913), s. 1174-1182.
 - * Bancel, Paul A., Circulation in Horizontal Water Tube Boilers, The Journal of the American Society of Mechanical Engineers, Vol. 38, No. 1 (1916), pp. 17-21.
 - * Barnes, Eleanor C. (Lady Yarrow), Alfred Yarrow - His Life and Work, Edward Arnold & Co., London (1923), pp. 123-138.
 - * Guillaume, M., Erfahrungen und Forderungen des praktischen Kesselbetriebes, VDI Zeitschrift, Band 68, Nr. 9 (1924), s. 185-193, Nr. 11, (1924), s. 255-264.
 - * Seidel, H., Die Berechnung des Wasserumlaufes in Kesselrohrbündeln und ihre Bedeutung für die Konstruktion von Wasserrohrkesseln, Dissertation von der Technischen Hochschule München (1931).
 - * Ziegler, Korrosionsschäden an 45-atü-Kesseln und ihre Beseitigung, Mitteilungen der Vereinigung der Grosskesselbesitzer, Heft 32 (1931), s. 121-127.
 - * Loschge, A., Die Dampfessel, Verlag von Julius Springer, Berlin (1937).
 - * Ledinegg, M., Unstabilität der Strömung bei natürlichen und Zwanglauf, Die Wärme, Band 61, Nr. 8 (1938), ss. 891-898.
 - * 菅原菅雄, 蒸気罐及蒸気原動機, 丸善 (1941).
 - * 石谷清幹, 赤川浩爾, 気水混合物流動の研究, 化学機械, Vol. 14, No. 6 (1950), p. 273.
 - * Ledinegg, M., Dampferzeugung, Springer-Verlag, Wien (1952)
 - * 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), 機論, Vol. 19, No. 88 (1953), pp. 40-44.
 - * 赤川浩爾, 小泉倫吉, 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2報 気液混合物の摩擦係数), Vol. 20, No. 92 (1954), pp. 280-285.
 - * 赤川浩爾, ボイラの水循環に関する研究, 京都大学学位論文 (1958).
 - * Schrock, V. E., Grossman, L. M., Forced Convection Boiling Study, Final Report on Forced Convection Vaporization Project, USAEC Rep. TID-14639 (1959).
 - * Kutateladze, S. S., Boiling Heat Transfer, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 4, (1961), pp. 31-45.
 - * Bennett, J. A. R., Collier, J. G., Pratt, H. R. C., Thornton, J. D., Heat Transfer to Two-Phase Gas-Liquid Systems, Part I, Steam/Water Mixtures In the Liquid Dispersed Region in an Annulus, Trans. Instn. Chem. Engrs, Vol. 39 (1961), pp. 113-126.
 - * Collier, J. G., Hewitt, G. F., Data of Vertical Flow of Steam-Water Mixture in the Annular and Dispersed Glow Region, Part II. Film Thickness and Entrainment Data and Analysis of Pressure Drop Measurements, Trans. Instn. Chem. Engrs, Vol. 39 (1961), pp. 127-136.
 - * Quandt, E. R., Analysis and Measurement of Flow Oscillation, Chem. Eng. Symp. Ser. No. 32, Vol. 57, Heat Transfer, Buffalo (1961), pp. 111-126.
 - * 石谷清幹, 気液二相流研究の現状, 機械学会誌, Vo. 66, No. 528 (1963), pp. 58-66.
 - * Collier, J. G., Lacey, P. M. C., Pulling, D. J., Heat Transfer to Two-Phase Gas-Liquid Systems, Part II, Further Data on Steam/Water Mixtures in the Liquid Dispersed region in an annulus, Trans. Instn. Chem. Engrs, Vol. 42 (1964), pp. 127-139.
 - * Tong, L. S., Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow, John Wiley & Sons, New York (1965).
 - * Bennett, A. W., Hewitt, G. F., Kearsley, H. A., Keyes, S. K. F., Lacy, P. M. C., Flow Visualization Studies at High Pressure, AERE-R4874 (1965).
 - * 植田辰洋, 気液混合物の垂直管内上昇流について-第1報, 流れに対する実験と考察, 第2報, 摩擦損失とボイド率に対する考察, 機論 (第2部), Vol. 33, No. 248 (1967), pp. 601-610, pp. 611-618.
 - * Davis, A. L., Potter, R., Hydraulic Stability: An Analysis of the Cause of Unstable Flow in Parallel Channels, Proc. the Symposium on Two-Phase Flow Dynamics, Eindhoven, Vol. 2, Session 9

- (1967), pp. 1225-1266.
- * Wallis, G. B., One-Dimensional Two-Phase Flow, McGraw-Hill, New York (1969).
 - * 赤川浩爾, 坂口忠司, 河野誠, 西村雅晴, 並列蒸発管系の流量分配と流動の安定性に関する研究, 機論 (第2部), Vol. 36, No. 292 (1970), pp. 2104-2115.
 - * 赤川浩爾, 坂口忠司, 強制流動蒸発管系における摩擦損失に関する研究 (第2報, 動特性の理論的研究; 第3報, 動特性の実験的研究), 機論 (第2部), Vol. 37, No. 295 (1971), pp. 526-534, pp. 1212-1219.
 - * Lahey, Jr., R. T., Yadigaroglu, G., NUFREQ, A Computer Program to Investigate Thermo-Hydrodynamic Stability, NEDO-13344, GE (1973).
 - * Saha, P., Thermally Induced Two-Phase Flow Instabilities, Including the Effect of Thermal Non-Equilibrium between the Phases, PhD diss., Georgia Institute of Technology, Atlanta (1974).
 - * 赤川浩爾, 気液二相流, コロナ社 (1974).
 - * Lahey, Jr., R. T., Moody, F. J., The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor, American Nuclear Society, Downers Grove (1977).
 - * Nakanishi, S., Ozawa, M., Ishigai, S., Mizuta, Y., Analytical Investigation of Density Wave Oscillation, Technology Report, Osaka University, Vol. 28, No. 1421 (1978), pp. 243-251.
 - * Takitani, K., Sakano, K., Density Wave Instability in Once-Through Boiling Flow System (III) – Distributed Parameter Model, J. Nuclear Science and Technology, Vol. 16, No. 1 (1979), pp. 16-29.
 - * 二相流ダイナミクスに関する日米セミナー (1979), 論文は[69]に採録.
 - * Lahey, Jr., R. T., Drew, D. A., An Assessment of the Literature related to LWR Instability Modes, NUREG/CR-1414 (1980).
 - * 植田辰洋, 気液二相流一流れと熱伝達, 養賢堂 (1981).
 - * 中西重康, 自然循環ボイラの簡略流動計算法, 機論 (B), Vol. 52, No. 479 (1986), pp. 2682-2688.
 - * Ishigai, S. ed., Steam Power Engineering, Cambridge University Press, New York (1999).
 - * 石谷清幹, 赤川浩爾, 中西重康, 西川栄一, 藤井輝重, 小澤守, 蒸気動力, コロナ社 (1989).
 - * Ozawa, M., Asano, H., Advances in Power Boilers, Elsevier, Amsterdam (2021).
 - * 小澤守, 蒸気罐發達史, クラフティヴ電子出版 (2023).