

減圧下における自然循環特性に関する研究

(第1報, 揚水特性に与える流動様式, 圧力および浸水率の影響)

中里見 正 夫*・川 上 靖*

Characteristic of Natural Circulation Under The Reduced Pressure.
(1. The Effects of Flow Pattern, System Pressure and The Ratio of
Liquid Level on The Water Flow Rate)

Masao NAKAZATOMI and Yasushi KAWAKAMI

Abstract

The relationship between a water flow rate and a heat flux is demonstrated and discussed based on the experimental results in natural circulation under the reduced pressure of water. The system pressure is 20~100 mmHg (0.027~0.136 ata), and the tube used is 21.7mm inner diameter. The flow pattern observed in the tube is frothy and annular flow characterized by the outbreak boiling. Maximum water flow rate is obtained with the heat flux of $(3.0\sim 5.0)\times 10^8$ kcal/m²h. The value of ratio between initial water level and test tube length has influence on the water flow rate strongly.

1. ま え が き

減圧下における沸騰伝熱特性に関しては、古くから数多くの研究が行われてきた。減圧された系での自然循環では、この沸騰特性が強く影響を及ぼすことが予想され、加圧下の場合とは様相が異なるものと考えられる。この分野に関しては、省エネルギーや低温度差熱源の有効利用に関連して近年、研究の要請が高まりつつある。

本研究の目的は、減圧下の自然循環に着目し、実験によって基礎データを積み重ね、揚水特性に与える諸因子の影響を明らかにし、この分野の機器設計に資することにある。

本報では、内径21.7mm、長さ1.05mの揚水管を使用し、加熱用熱源としては40~70°Cの温水を用いた。実験装置の圧力は20~100mmHg(0.027~0.136 ata)である。実験結果によると、揚水量には浸水率が強く影響を及ぼす。揚水量を最大にするためには、適切な範囲の熱

流束の値が存在し、これより大きくても小さくても揚水量は急激に減少する。この有効熱流束は圧力の変化によって多少変化し、減圧とともに小さい値へと移行する。揚水管内の流動様式は、主としてフロス流と環状流であり、熱流束の値が小さい場合には間欠的揚水となっている。

2. 使用した記号

C_{ph} : 温水の比熱 kcal/kg°C
 d : 管内径 mm
 F : 全伝熱面積 m²
 F_{Ts} : 管の断面積 m²
 G_h : 温水の重量流量 kg/h
 G_s : 復水の重量流量 kg/h, kg/s
 j_g : みかけの蒸気速度 (= $G_s \cdot v'' / F_{Ts}$) m/s
 L : 長さ m
 L_w : 初期水位 (蒸発器上面からの水位) m
 P : 圧力 mmHg, ata

* 宇部工業高等専門学校機械工学科

- Q : 熱量 kcal/h
- q : 熱流束 kcal/m²·h
- r : 蒸発熱 kcal/kg
- t_h : 温水の温度 °C
- V_s : 復水流量 l/min
- V_w : 揚水流量 l/min
- v'' : 蒸気の比容積 m³/kg
- ζ : 式(4)で定義される揚水流量比 (=V_w/V_s)
- φ : 式(5)で定義される浸水率 (=L_w/L_{TS})

- 添字 1 : 入口
- 2 : 出口
- TS : 供試管

3. 実験装置および実験方法

図1に実験装置の概要を示す。蒸発器 SG とレベルタンク LT 内には一定のレベルまで蒸留水が封入されている。レベルタンクは寸法が 350×500×高さ350mm の

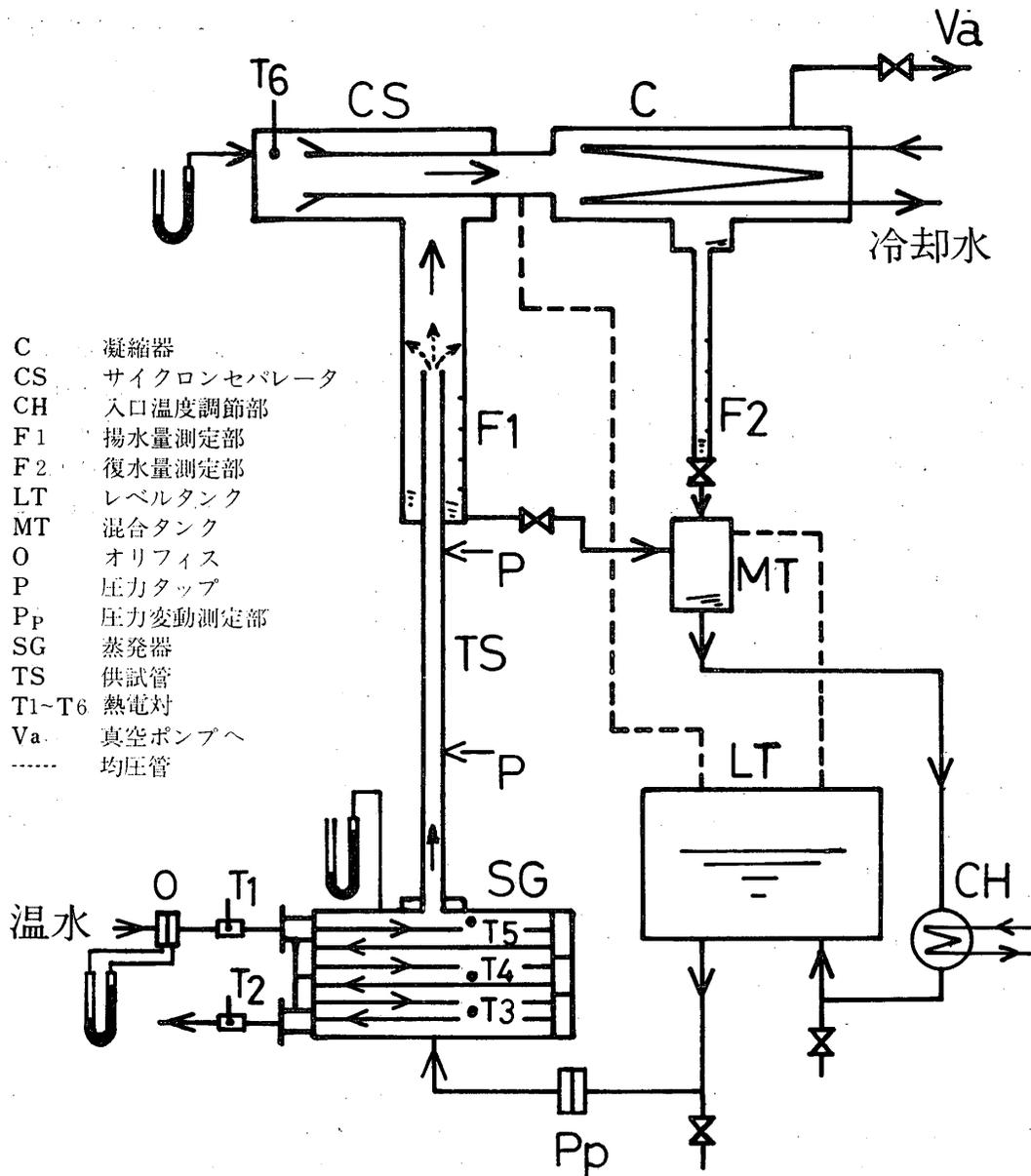


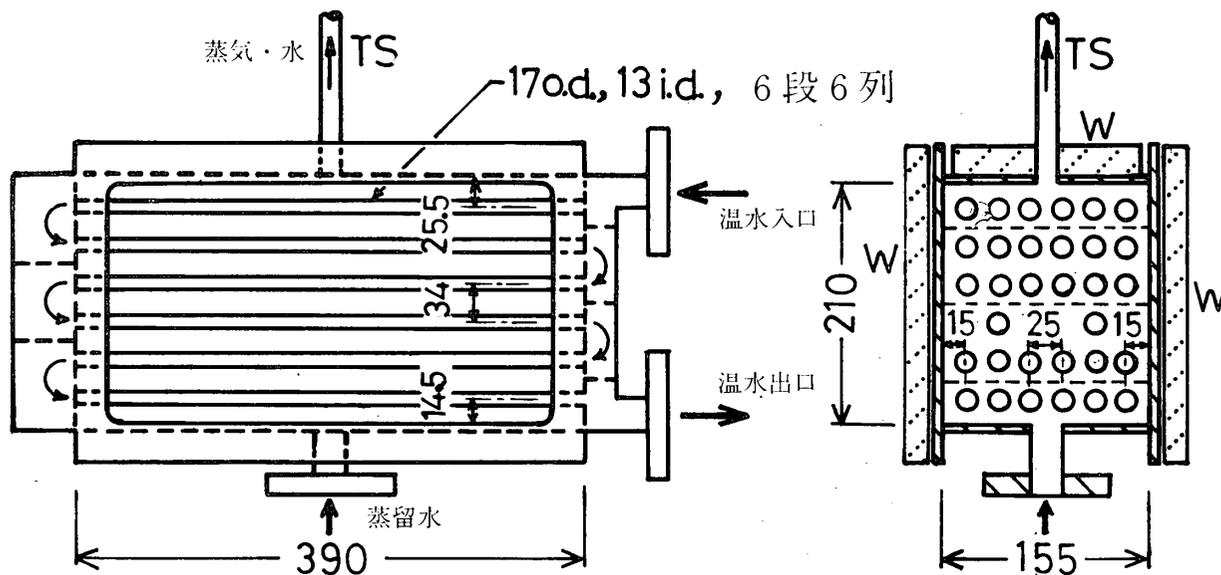
図1 実験装置概要

ステンレス鋼製で、内部の水面を観察できるように側面に観察窓が取り付けられている。蒸発器は5mmのステ

ンレス鋼製で内部には6段6列の加熱管(13.0 i. d., 17.2 mm o. d.)が取り付けられ、内部の沸騰状況が観

察できるように両サイドと上面に観察窓が設けられてい

る。その詳細を図2に示す。温水は加熱管の最上段に供



TS : 供試管, W : 観察窓

図2 蒸発器の詳細

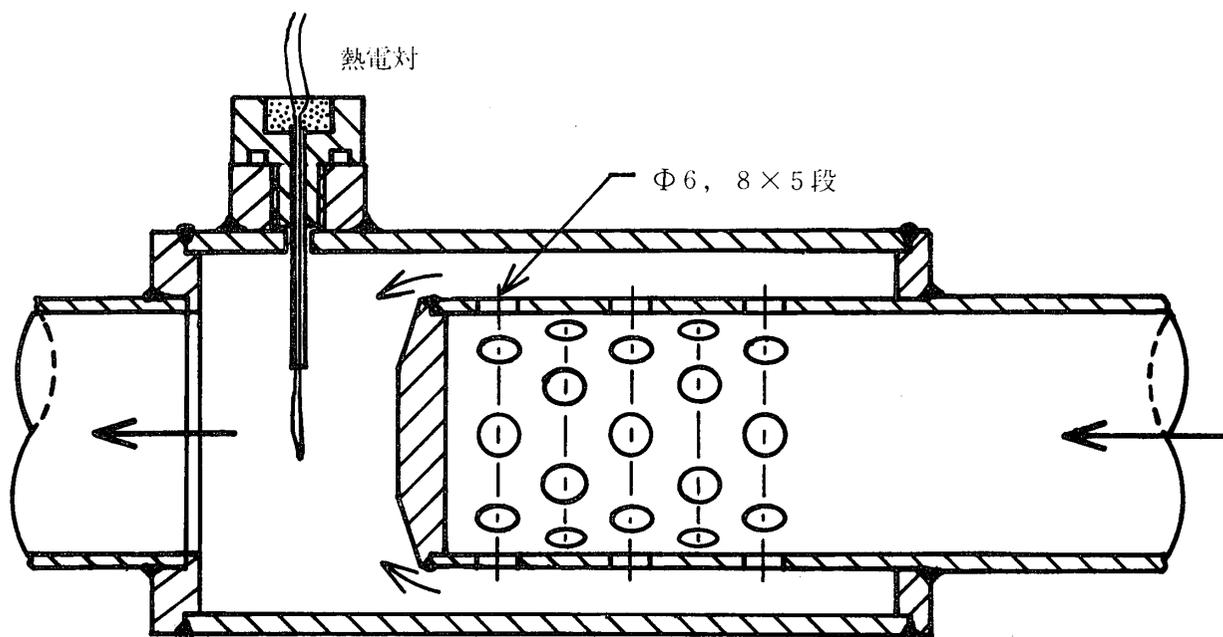


図3 温水の混合平均温度測定部

給され、順次下段に流入し最下段から出ていく。蒸発器の上面中央には供試管 TS (内径21.7mm、長さ1.05m) が接続されている。温水が蒸発器の加熱管に供給されると蒸留水を加熱沸騰させ、発生した蒸気は飽和水を伴い二相流となって供試管内を上昇する。二相流体は供試管の上部に接続されている揚水量測定部 F1 (69.7 mm i. d.) およびサイクロンセパレータ CS 内で分離され、

液体は F1 を経て混合タンク MT へ、蒸気は凝縮器内に入り復し流量測定部 F2 を経て混合タンクへそれぞれ流入する。混合タンク内で合流した液体は入口温度調節部 CH およびレベルタンクを経て蒸発器の底部へ導かれている。また、レベルタンクと凝縮器および混合タンクは均圧管で接続されている。

供試管および揚水流量測定部 F1 と復水流量測定部

F2 は内部が観察できるように透明なアクリル管で製作した。供試管には2箇所圧力タップが取り付けられ、静圧および差圧マノメータに接続されている。また、蒸発器上面とサイクロンセパレータにも圧力測定用タップが取り付けられている。蒸発器に供給される温水の入口、出口温度の測定には、平均温度が測定できるように混合部を設けその直後に熱電対をそう入した。図3にはその構造の詳細を示す。

実験に際しては、真空ポンプを用いて所定の圧力まで減圧し、蒸発器に温水を供給して内部の水を循環させ、装置全体の温度上昇と脱気を十分に行ううえで測定に入るようにした。

測定量としては、温水の入口、出口温度と流量、揚水および復水流量、供試管の静圧、差圧、蒸発器およびサイクロンセパレータの圧力、飽和水と蒸気の温度、レベルタンク内の水位、供試管内の流動様式と蒸発器内の沸騰状況の観察である。

実験条件は次のとおりである。供試管：内径 $d=21.7$ mm, 長さ $L_{rs}=1.05$ m, システム圧力（セパレータ圧力）： $P=20\sim 100$ mm Hg (0.027~0.136 ata), 加熱方法：温水加熱, 温水温度 $t_h=35\sim 66^\circ\text{C}$, 熱流束： $q=400\sim 10^4$ kcal/m²·h, 浸水率： $\phi=0.0\sim 0.286$ 。

4. 実験結果と考察

4. 1 揚水流量 V_w および復水流量 V_s と平均熱流束との関係

蒸発器内の観察によると、沸騰は最上段から2~3段目の加熱管とその側壁に限られていて、他の加熱管および側壁の下部は対流伝熱面となっている。このように全伝熱面が均一な熱流束ではないが、ここでは加熱管の外表面積と温水の流動する側壁面の合計面積 F に対する平均熱流束 q を次式のように表わす。

$$q=Q/F=G_h \cdot C_{ph} \cdot (t_{h1}-t_{h2})/F \quad (1)$$

ここに、 Q は単位時間当りの伝熱量、 G_h と C_{ph} は温水の流量と比熱、 t_{h1} と t_{h2} は温水の入口と出口の温度、 F は全伝熱面積 ($F=0.799\text{m}^2$) である。

図4はたて軸に揚水流量 V_w と復水流量 V_s をとり横軸に式(1)で計算した平均熱流束 q をとって示したものである。実験条件は、圧力 $P=62\sim 71$ mmHg (0.085~0.096 ata), 蒸発器上面からの初期水位 $L_w=200$ mm ($\phi=0.190$) である。同図にみられるように、 V_w 対 q の関係は凸形の曲線を示し、 V_w を大にするためには適当な熱流束範囲が存在する。

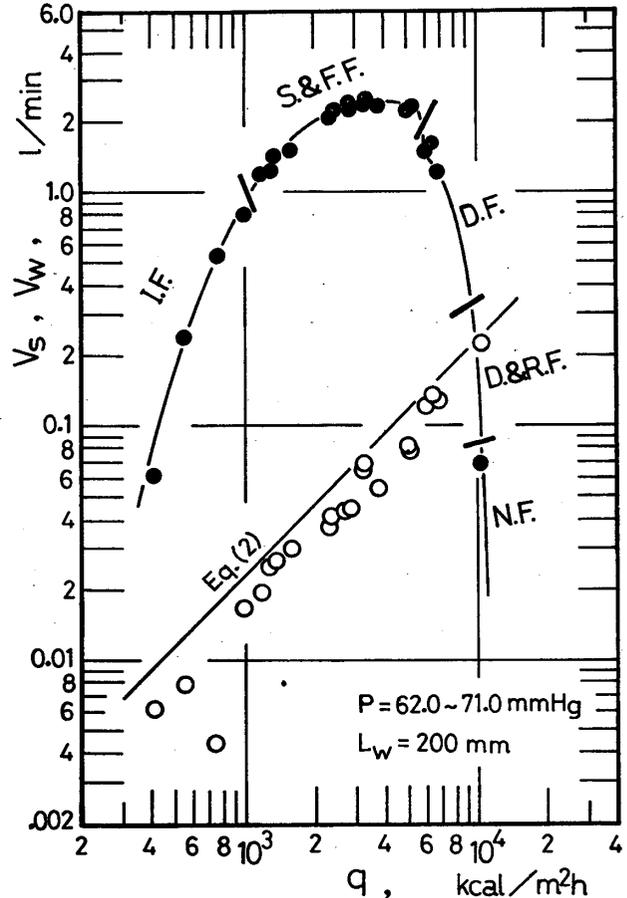


図4 揚水流量 V_w および復水流量 V_s と q の関係

図4中には、揚水時に供試管を流動する二相流の流動様式の分類を観察にもとづいて記入した。熱流束の値を小さい方から段階的に上昇させていくと、対流伝熱領域を経て沸騰領域に至る。沸騰が開始しても q の値が比較的小さい内は、突沸的沸騰（間欠沸騰）^{(1), (2)} であるため沸騰休止期間も長く、発生する蒸気量が少ないので揚水するまでに至らないが、供試管の途中の断面まで水を押し上げるようになる。この水頭の増加が原動力となって封入されている水は蒸発器とレベルタンクの間でU字管振動を始める。この振動の周期と突沸の周期とは当然ながら一致している。 q の増大とともに振動の振幅は減少し、周期は増加するが、レベルタンク内の水位の観察によると揚水する全熱流束域にわたってU字管振動が認められた。

間欠沸騰領域であっても沸騰時間のしめる割合が長くなると、その間に揚水される。そのために、揚水開始点を実験的に決定するにはかなりの幅がでてくる。 q の値が上昇して沸騰が時間的に連続するようになってくると、発生した蒸気は飽和水を伴って供試管を上昇し揚水

量は急激に増加してくる。供試管内には揚水時に水膜が形成されるが、次に続く沸騰休止中に水膜は流下してしまういわゆる間欠揚水の流れ (I.F.) が観察される。 q の値が $10^8 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ 程度になると、蒸発器内の沸騰が連続的になり供試管内には水膜が形成され、U字管振動と関連して遊動波流とフロス流とが交互に出現する流れ (S.&F.F.) となる。さらに q の値が増加すると V_w の値はピークを形成し、ついで急激に減少傾向をとる。 q の増加につれて V_w の値が減少する領域の流れは、主として環状流となっていて図4中に記したように擾乱波領域 (D.F.)、擾乱波とリップ流が交互に現われる領域 (D.&R.F.)、液膜破断領域 (N.F.)、蒸気みの流れへと移り変わる。環状流領域の流れも前記のU字管振動の周期と密接に関連していて、蒸発器内の水面が上昇傾向のときには擾乱波流となり、下降傾向のときには擾乱波は消滅しリップ流となる。

復水流量 V_s と q の関係は図4にみられるように正比例の関係にある。なお、同図中に示した実線は、加熱量 Q がすべて蒸発に費やされたとして次式で算出した値を示したものである。

$$V_s = Q / 60 \cdot r \quad (2)$$

ここに、 r は蒸発熱で系の圧力に対応してとる。蒸発器に供給される水が多少サブクールされているので、 V_s の測定値と実線との間に差がある。

4.2 供試管の入口形状が V_w 対 q 曲線に与える影響

図5は蒸発器の上面に取り付けた供試管の一部を蒸発器内に差し込んだ場合の寸法図である。最上段の加熱管から供試管入口断面までの間隔はほぼ25mmあるので、供試管の差し込み長さは同図のように $L = 0, 5, 15 \text{ mm}$ (type A, B, C) の3とおりとした。

図6には、type A, B, Cを用いてそれぞれ測定した結果を示した。実験条件は、圧力 $P = 37 \sim 46 \text{ mmHg}$ ($0.050 \sim 0.062 \text{ ata}$)、 $L_w = 200 \text{ mm}$ である。同図にみられるように、type A, B, Cの3とおりの条件に対する測定結果 V_w 対 q の関係にはほとんど差異が認められない。蒸発器内の水面の観察結果によると、type Aでは波立ちの波頭が蒸発器の上面に触れていることが多い。しかし、type BとCでは供試管の入口断面の位置まで水面が押し下げられるために、波頭は蒸発器の上面には触れ得なくなる。この程度の蒸発器内の現象の相違は、図6のように揚水量 V_w にはほとんど影響を与えない。このような測定結果に基づいて、以下の実験はtype Aの供試管取付方法を用いて行った。

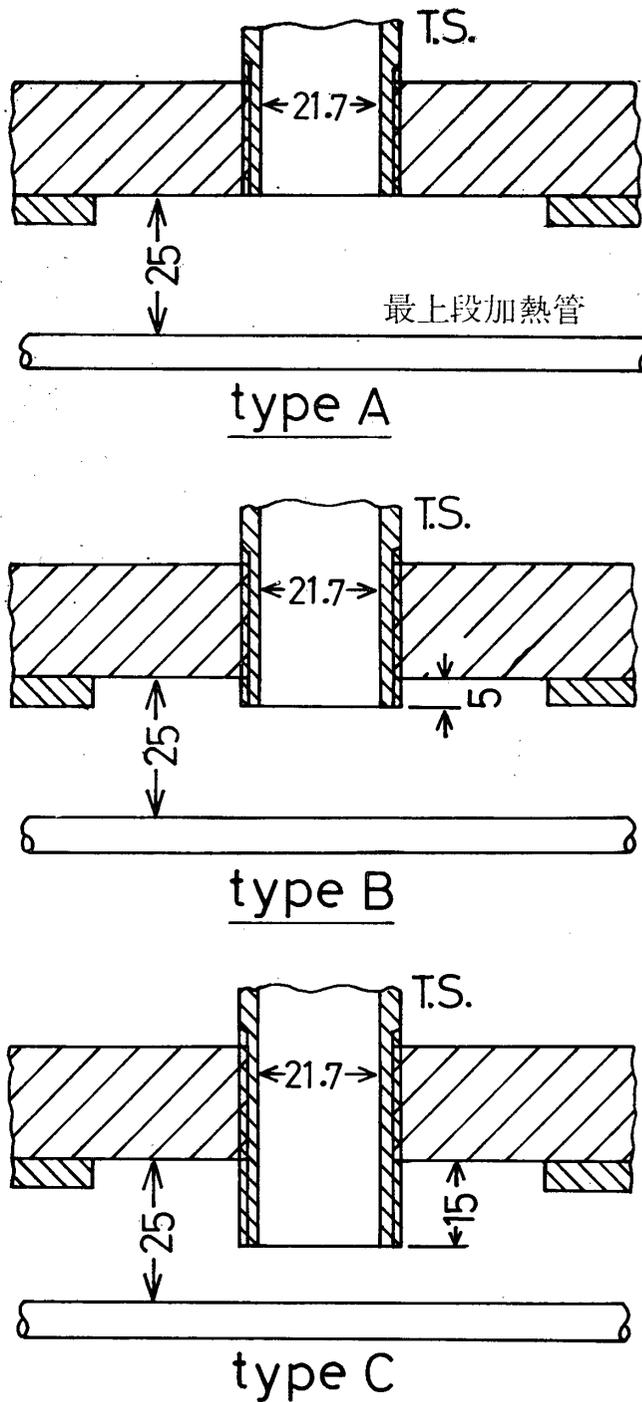


図5 供試管入口の詳細

4.3 圧力の影響

図7は揚水量 V_w 対熱流束 q の関係に与える圧力の影響を調べたものである。圧力の範囲は $P \cong 23, 40, 70, 100 \text{ mmHg}$ の4段階にわたって変化させた。同図にみられるように、本実験範囲では圧力の変化によって V_w 対 q 曲線が大幅に影響を受けることはないが、圧

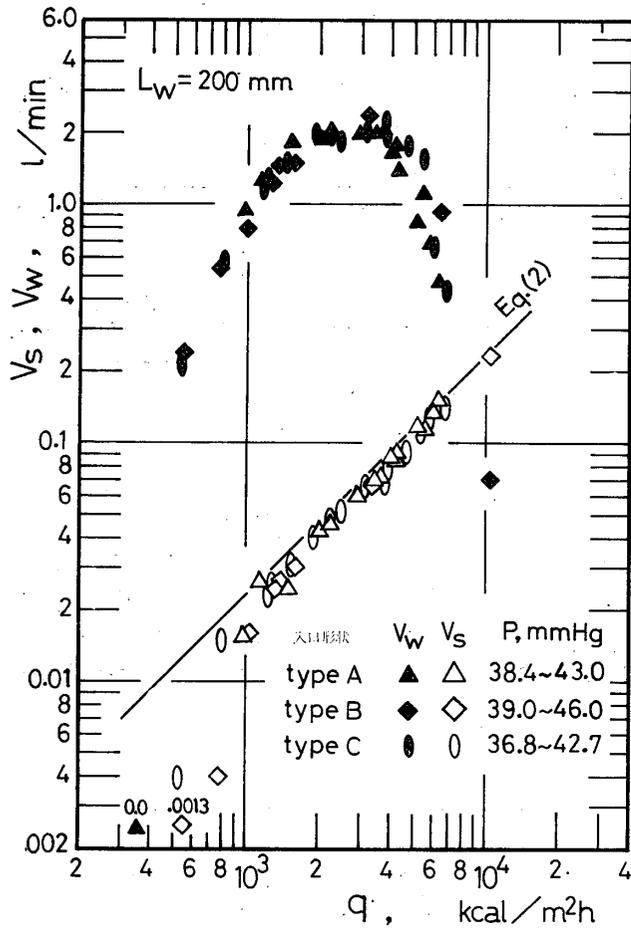


図6 供試管の入口形状と揚水量との関係

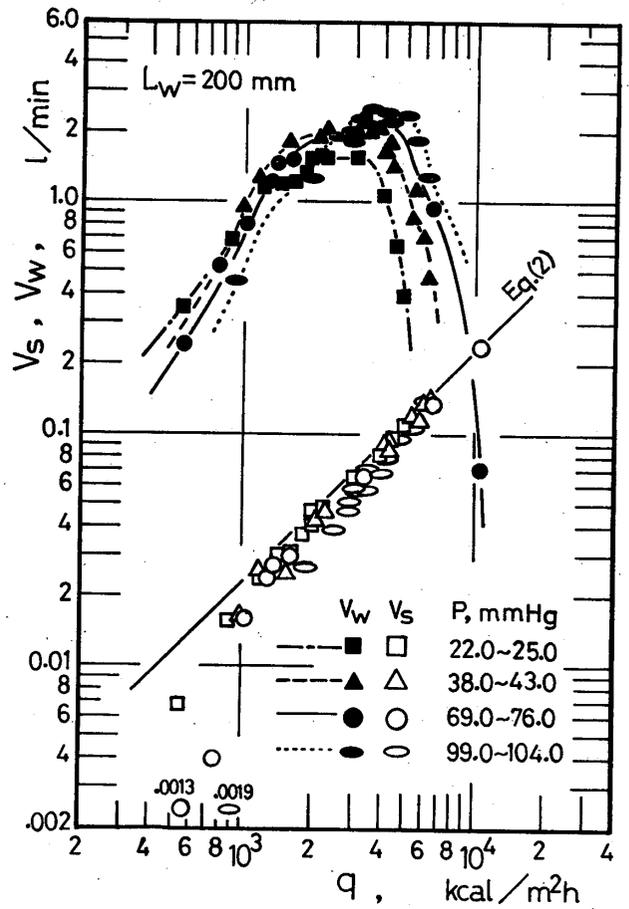


図7 圧力の影響

力Pの下降とともに $V_w - q$ 曲線は熱流束 q の小さい方へ移動し、なお、 V_w のピーク値が減少する傾向を示している。これを供試管内の流動様式と対比すれば、低圧になるにつれてフロム流が出現し難くなり、流れが環状流となっているためである(図8参照)。特に、 $P=23, 40 \text{ mmHg}$ では q の値の小さい突沸領域を除いて他は環状流(A.F.)となっている。なお、大気圧以上の圧力条件下において実現されるような気ほう流やスラグ流は出現しなかった。

次に、 q の増加とともに V_w の値が減少し始めるときの q 値は減圧とともに小さい方へ移行している。この原因は、圧力の減少に伴い蒸気の比容積が増加するので同一熱流束の値において減圧とともに蒸発器内の水面が下降し、その結果供試管への水の供給が不足するためである。

図8は、たて軸に V_w と V_s をとり、横軸

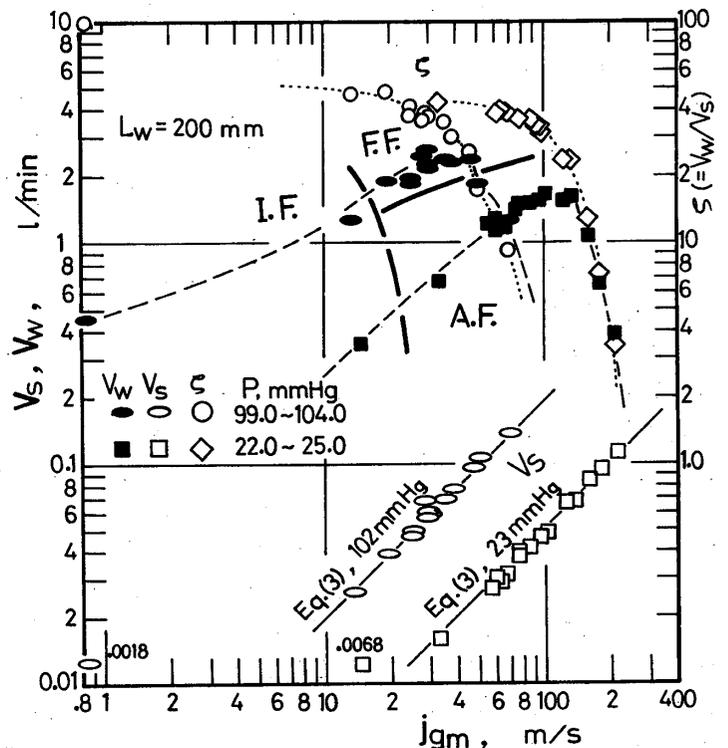


図8 V_w, V_s 対 j_{gm} および q 対 j_{gm} の関係

に供試管内の圧力（測定位置は出口端から 0.31m の断面）で換算した蒸気のみかけの速度 j_g をとって管内圧力 $P=23, 100\text{mmHg}$ の 2 例をプロットしたものである。なお、 j_g は次式で計算した。

$$j_g = G_s \cdot v^g / F_{Ts} \quad (3)$$

ここに、 G_s は復水の流量、 v^g は蒸気の比容積、 F_{Ts} は管の断面積である。なお、揚水流量と復水流量との比 ζ の値を同図中にプロットした。

$$\zeta = V_w / V_s \quad (4)$$

また、 V_s に対する実線は図 7 中に示した実線に対応する値である。

図 8 から明らかなように、 V_w 対 j_g は V_w 対 q 曲線と同様に上に凸形の曲線となる。 V_w の値のピークを示す j_g の値は圧力の変化に強く影響され、 $P=100\text{mmHg}$ では $j_g=20\sim 50\text{m/s}$ 、 $P=23\text{mmHg}$ では $j_g=80\sim 140\text{m/s}$ となっている。このときの揚水流量比 ζ の値は圧力の差異とは関係なく、ほぼ同程度の値 $\zeta=25\sim 40$ となっている。

揚水量曲線がピークを形成するためには適当な熱流束の値の存在することをすでに指摘したが、この熱流束をここでは有効熱流束と呼ぶことにする。有効熱流束の値は圧力の変化によって影響を受けるようである。

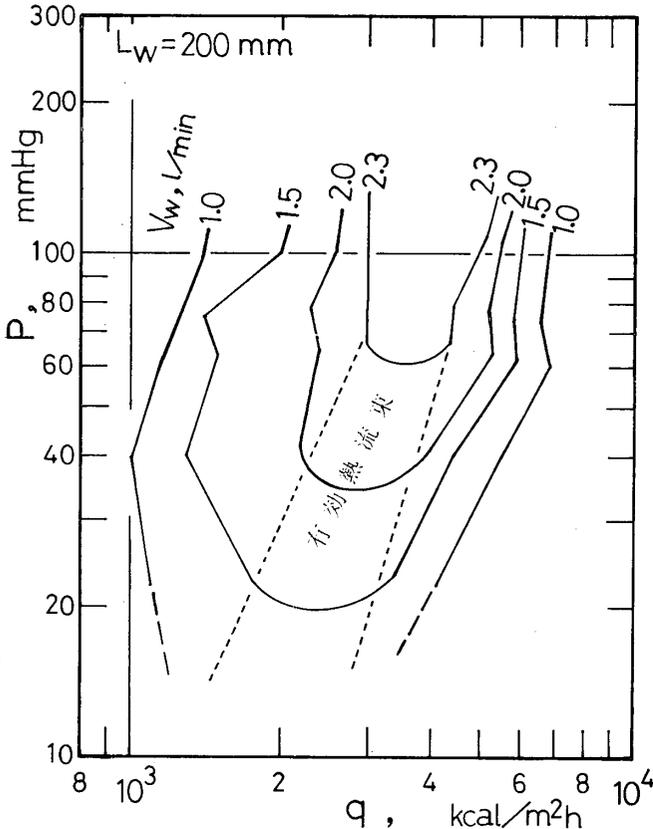


図 9 等揚水量線に与える圧力の影響

図 7 の各圧力に対して、揚水量がピークとなる熱流束の値には微妙な差異のあることがうかがえる。図 9 は、この傾向を一層明瞭にするために等揚水量線図に引き直して示したものである。等揚水量線は圧力の減少につれて熱流束の小さい値の方へ移行する傾向があり、有効熱流束の値も同様に圧力の降下に比例して減少している。最大揚水量もわずかであるが減圧とともに減少する。

4.4 浸水率の影響

蒸発器の上面を基準面とし、それぞれ封入水面までの距離を L_w 、供試管の出口までの長さを L_{Ts} とすると、浸水率 ϕ は次のように定義される。

$$\phi = L_w / L_{Ts} \quad (5)$$

本報の場合には、 L_{Ts} は供試管の長さに相当し $L_{Ts} = 1.05\text{m}$ である。

図 10 は、浸水率 ϕ の値の変化が V_w 対 q 曲線にどの程度の差異となって現われるかを圧力がほぼ一定 ($P=60\sim 80\text{mmHg}$) のもとに調べたもので、 $\phi=0.0, 0.048,$

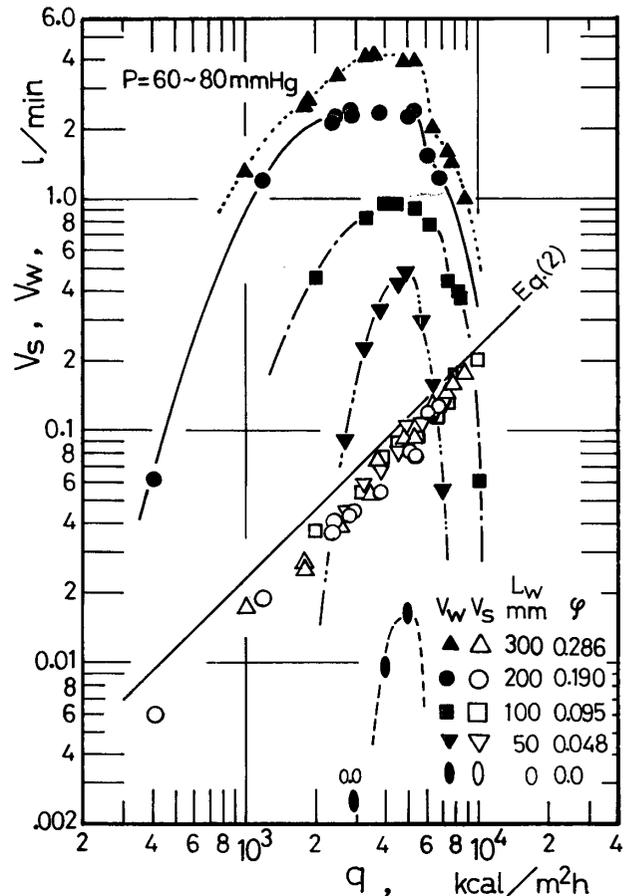


図 10 V_w 対 q の関係に与える ϕ の影響

0.095, 0.190および0.286の5種類の測定結果である。 ϕ の値の変化は V_w 対 q 曲線に大きい影響を与え、 ϕ の値が大になるほど揚水する熱流束の範囲は急激に拡張し、揚水量 V_w の値も急激に増加する。さらに、有効熱流束の領域も拡大する。逆に、特に ϕ の値が小さくなると、揚水する熱流束の範囲がせまくなり $V_w \cdot q$ 曲線はとがってくる。

図11(a)は揚水量 V_w をみかけの蒸気速度 j_g に對

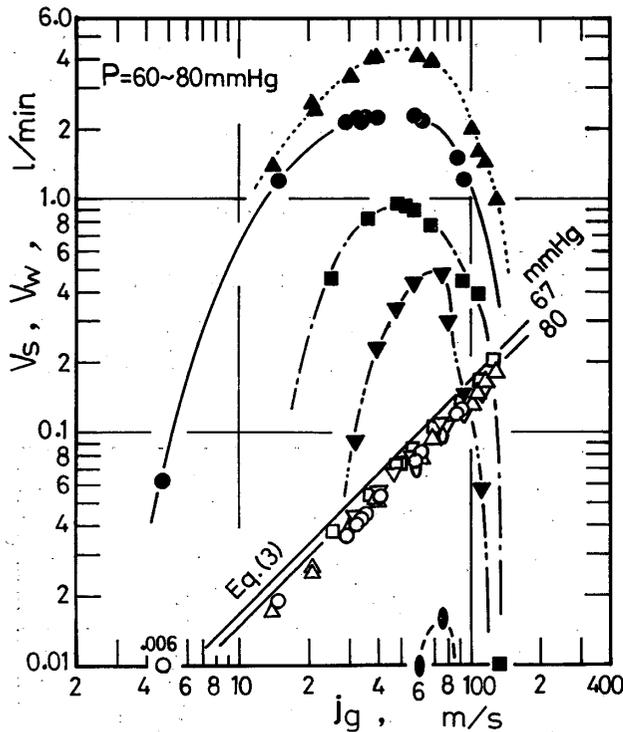


図11(a) V_w 対 j_g の関係に与える ϕ の影響

して示したものである。 j_g の算出に当り蒸気の比容積としてはセパレータ圧力に相当する値を用いた。同図の傾向は図10とほぼ同様であり、 V_w の値がピークとなるみかけの蒸気速度は $j_g = 40 \sim 60 \text{ m/s}$ となっている。 $\phi \leq 0.048$ の2例については V_w のピーク値に對する j_g の値は少し大きい方へ移動する傾向がみられる。

図11(b)はたて軸に揚水流量比 ζ をとり j_g に對して示したもので、実験点は図11(a)に對する。 ζ の値にも ϕ の変化による影響は強く現われ、 ϕ の値が大になるほど ζ の値は急激に増大している。 ζ のピーク値に對する j_g の値は一定値とはならない。 ϕ の値の増加とともに j_g の値は小さい方へ移行する傾向がみられ、図11(a)の V_w のピーク値に對する j_g の値とは一致しない。

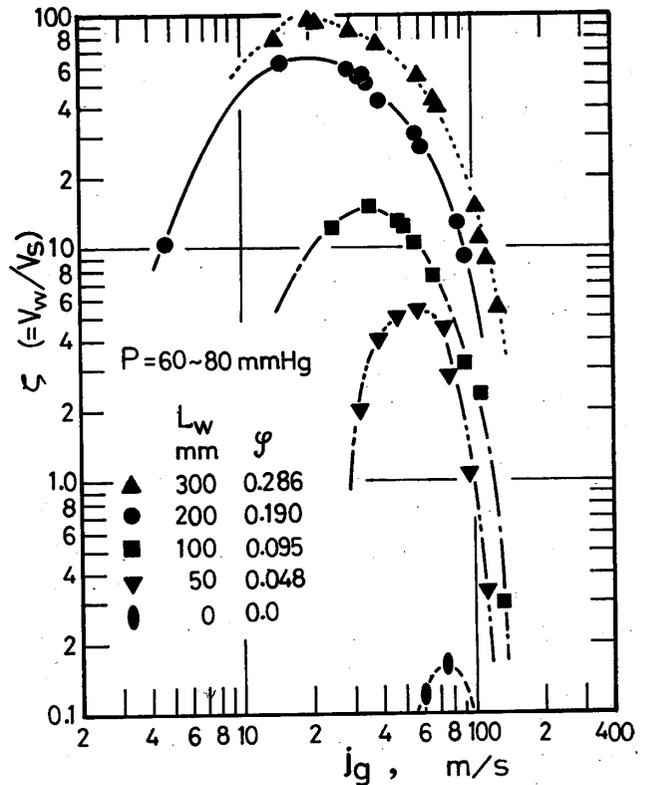


図11(b) ζ 対 j_g の関係に与える ϕ の影響

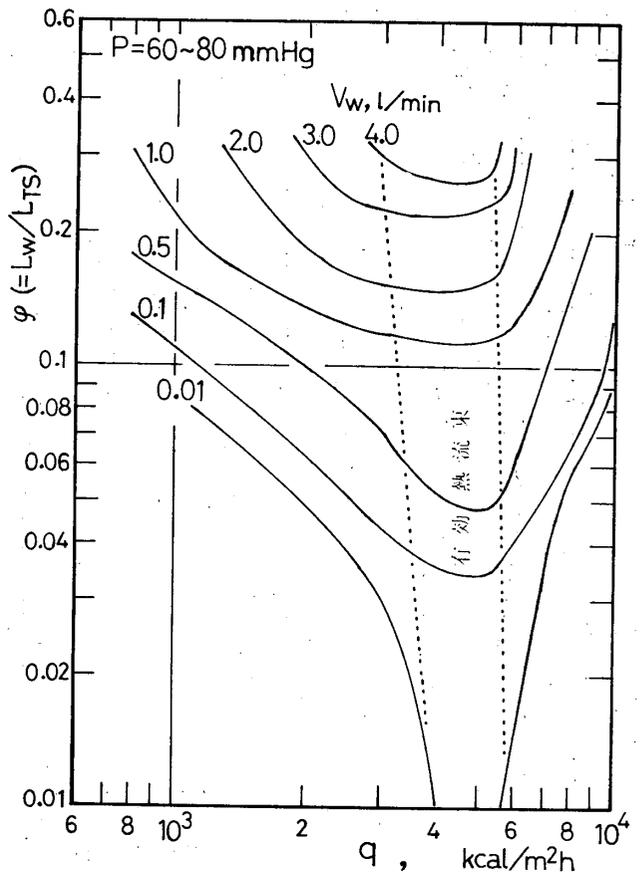


図12 等揚水量線に与える ϕ の影響

図12は、図10の測定結果から、等揚水曲線に引き直したもので、たて軸には浸水率 ϕ をとり横軸には熱流束 q をとって示したものである。 ϕ の値によって揚水量の最大値が決まることがわかる。また、有効熱流束と ϕ の関係が一層明りようにみられるようになっている。

5. あとがき

減圧された純水を温水にて加熱沸騰させ、内径21.7 mm、長さ1.05mの揚水管を用い、主として熱流束、圧力および浸水率を変化させて揚水特性を系統的に調べた。その結果を要約すると次のようである。

- (1) 揚水量と熱流束の関係は、上に凸形の曲線になり、揚水量のピークを与える適切な熱流束（有効熱流束と呼ぶことにする）の値が存在する。有効熱流束より高いかまたは低い熱流束では、揚水量は急減する。
- (2) 有効熱流束の値は、システム圧力0.081~0.136 ataでおおよそ $q = (3.0 \sim 5.0) \times 10^8 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ となっているが、この値は圧力の変化によって多少、系統的に変わる傾向がある。圧力0.027~0.054 ataに対して $q = (2.0 \sim 3.5) \times 10^8 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ となる。
- (3) 揚水管内の流動様式はフロス流または環状流であり、減圧するにつれて（圧力0.06 ata以下）フロス流が出現し難く環状流が主体を占める。熱流束が小さい場合

には、減圧プール沸騰特性において顕著な突沸の傾向が強く現われ、間欠的揚水となる。このときには、系内の水のU字管振動がもっともはげしくなる。

- (4) 浸水率の変化が揚水特性に及ぼす影響は非常に強く、浸水率の増大とともに揚水量は急激に増加し、揚水が行われる熱流束範囲および揚水量がピークとなる有効熱流束範囲もともに拡大する。浸水率が0.15以上の場合には揚水管内の流れは揚水効果の高いフロス流が実現する。
- (5) 圧力の変化が揚水量に与える影響はあまり大ではない。

終わりに、本研究を始めるに当り種々の御教示を戴いた世古口言彦教授（九大工）に深く感謝する。

また、本研究の費用の一部は昭和52年度文部省科学研究費補助金一般研究C（255078）によることを記して感謝の意を表する。

文 献

- (1) 西川ほか、第805回 熱工学講論、(昭和45—11)、37.
- (2) 中里見ほか、宇部工業高専研究報告、No.24 (昭53—3)、21.

(昭和53年9月1日受理)