

減圧下における自然循環特性に関する研究

(第2報 揚水特性に与える管直径の影響)

中里見 正 夫*・斉 藤 巧 七*

Characteristic of Natural Circulation Under the Reduced Pressure

(2. The Effects of Tube Diameter)

Masao NAKAZATOMI, Yoshikazu SAITO

Abstract

The paper presents the results of an experimental investigation of the characteristics of water flow rate by using 5 kinds of test section. The experiments were carried out in the following range of parameters : $D=25.75, 21.70, 16.40, 12.90, 10.35\text{mm}$, $P=60\sim 83\text{mmHg}$ (0.082~0.113 ata), $L_w=100, 50, 0\text{mm}$, $q=(0.43\sim 12)\times 10^3\text{ kcal/m}^2\text{ h}$, $t_h=50\sim 72^\circ\text{C}$. Empirical relationship is suggested for calculation of effective heat flux.

1. ま え が き

前報において、揚水特性に与える流動様式、圧力および浸水率の影響について述べた¹⁾。本報では、引き続きほぼ同様な条件下で管直径の影響について調べた。実験に用いた管は内径 25.75, 21.70, 16.40, 12.90, 10.35mm の5種類である。加熱用熱源としては 50~72°C の温水を用いた。実験装置の圧力は 60~83mmHg (0.082~0.113 ata)、初期水位は 100, 50, 0 mm ($\varphi=0.095\sim 0.0$) である。

実験結果によると、揚水量には管直径の変化が強く影響を及ぼす。揚水量を最大にするためには、適当な範囲の熱流束(有効熱流束)の値が存在し、その幅は比較的狭い。この有効熱流束には、管直径および前報で明らかになった圧力と浸水率が強く影響を与える。主要パラメータの影響の度合を実験結果から含味して、有効熱流束を与える実験式を得た。以下には得られた実験結果を提示する。

2. 使用した記号

c_p : 比熱 kcal/kg °C

D : 管内径 mm
 F : 面積 m^2
 G : 重量流量 kg/h, kg/s
 j_g : みかけの蒸気速度(式3) 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
 Q : 熱量 kcal/h
 q : 熱流束 kcal/ $\text{m}^2 \cdot \text{h}$
 q_e : 有効熱流束 kcal/ $\text{m}^2 \cdot \text{h}$
 r : 蒸発熱 kcal/kg
 t : 温度 °C
 V : 流量 l/min
 v'' : 蒸気の比容積 m^3/kg
 ζ : 式(4)で定義される揚水流量比 ($=V_w/V_s$)
 φ : 浸水率 ($=L_w/L_{TS}$)

添字

1 : 入口
 2 : 出口
 h : 温水(加熱用)
 s : 蒸気または復水
 TS : 供試管
 w : 飽和水

* 宇部工業高等専門学校機械工学科

3. 実験装置および実験方法

実験装置および実験方法に関しては、前報¹⁾において詳述したのでここでは概略にとどめる。実験に用いられた供試管は次の5種類である。

管内径 D , mm	長さ L , m	入口形状 ¹⁾
25.75	1.052	type A
21.70	1.034	〃
16.40	1.034	〃
12.90	1.034	〃
10.35	1.034	〃

管内径の変化による影響をみるために実験条件は次のように限定した。システム圧力 $P=60\sim 83\text{mmHg}(0.082\sim 0.113\text{ata})$, $L_w=100, 50, 0\text{mm}(\phi=0.095\sim 0)$, $q=(0.43\sim 12)\times 10^3\text{kcal/m}^2\text{h}$, $t_h=50\sim 72^\circ\text{C}$ (温水加熱)である。

実験に際しては、蒸留水を所定の水位 L_w まで装置内に封入し、真空ポンプを用いて減圧する。次に、蒸発器に温水を供給し封入した蒸留水を加熱沸騰させ循環させる。装置全体の温度上昇と脱気を十分に行ったのち測定に入るようにした。熱流束 q の値は温水の流量調整によって加減した。測定量は前報と同様である。

蒸発器内の伝熱管は6段6列で構成されている。それらの伝熱面は沸騰伝熱面と対流伝熱面とが現実生じて均一な熱流束とはいえないが¹⁾、全伝熱面に対する平均熱流束 q を次式のように表わし、以下にはこの値を用いる。

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

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} は温水の蒸発器への入口と出口温度および F は全伝熱面積 ($F=0.799\text{m}^2$) である。

4. 実験結果と考察

4.1 一般的性質

蒸発器の伝熱管に温水を供給し、熱流束 q の値を除々に上昇させていくと、対流伝熱域を経て沸騰領域に至る。沸騰が開始した後、 q の値が比較的小さい間は減圧条件下で特徴的な間欠沸騰であるため、沸騰休止期間が長く発生する蒸気量も少量なので揚水するに至らないが、周期的に供試管の途中の断面まで飽和水を押し上げるようになる。この周期的な水頭の増加が原動力となって、装置内に封入されている水は蒸発器とレベルタンクの間でU字管変動を始める。この変動の周期は突沸周期

と一致している。 q の増加とともに沸騰休止期間が短くなり、変動の振幅は減退し周期は増進する。しかし、揚水が行われる全熱流束域にわたってU字管変動は認められ消滅することはなかった。

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内を上昇し二相流を形成する。揚水量は急激に増加してくる。さらに、 q の値が上昇すると、揚水量曲線はピークを形成し、次に急激に下降する。つまり、揚水量 V_w 対 q の関係は上に凸の曲線となる。 V_w がピークに達したときの熱流束を有効熱流束 $E.H.F.$ (Effective heat flux)¹⁾ と称することにする。

さらに q の増加と共に V_w の値は急減しついにゼロとなる。この上限の熱流束を $L.H.F.$ (Limited heat flux) と称することにする。

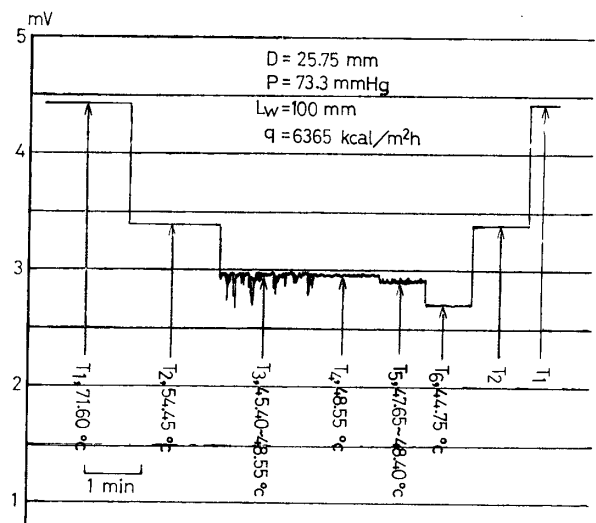
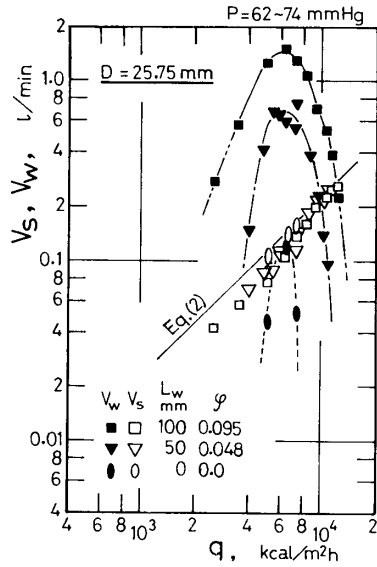


Fig. 1 Typical result of thermocouples record

図1は、管直径 $D=25.75\text{mm}$ を用いた場合で V_w の値がほぼピークに達したときの各部熱電対の記録の一例を示したものである。 T_1 および T_2 は加熱用温水の蒸発器入口および出口の温度、 T_3 、 T_4 および T_5 はそれぞれ蒸発器内下部、中央部および上部の温度、 T_6 はセパータの蒸気温度である(前報図1参照)。 T_3 の温度変動は多少サブクールした水が蒸発器へ戻ってきていることを示している。 T_4 は飽和水の温度、 T_5 は飽和蒸気と飽和水の温度である。 T_4 と T_5 の温度の差異は水頭差による飽和温度の相違に相当する。

4.2 揚水流量 V_w 対熱流束 q の関係に与える管直径 D の影響

図2(a)~2(e)はたて軸に揚水流量 V_w と復水流量 V_s を



(a) $D=25.75\text{mm}$

Fig. 2 V_w, V_s against q

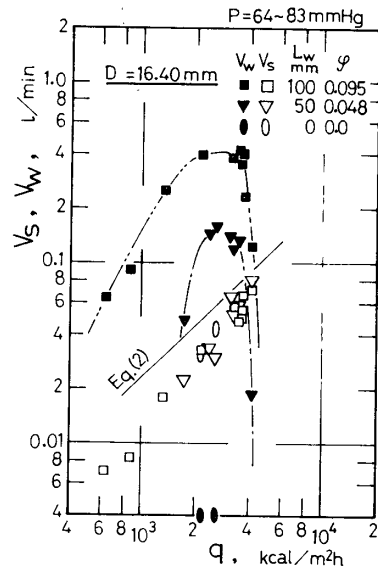


Fig. 2 (c) $D=16.40\text{mm}$

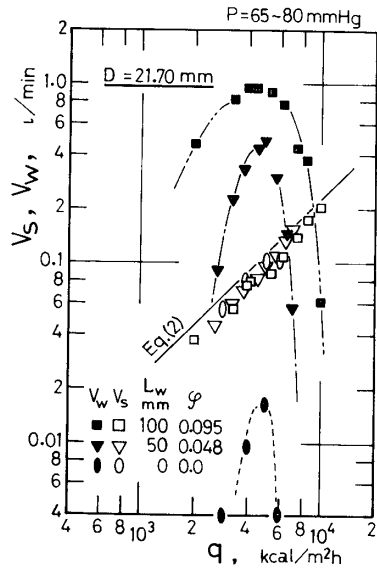


Fig. 2 (b) $D=21.70\text{mm}$

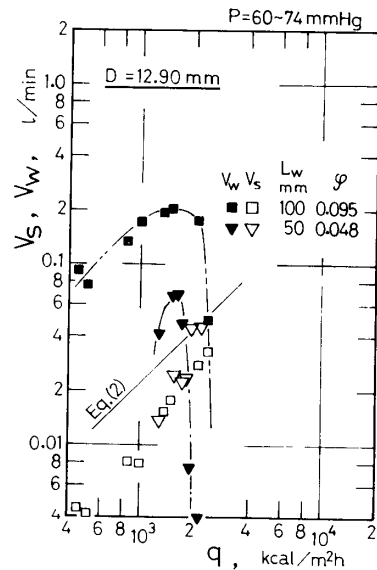


Fig. 2 (d) $D=12.90\text{mm}$

とり横軸に式(1)で算出した平均熱流束 q をとって示したものである。復水流量 V_s は、蒸発器内で発生した蒸気が周囲の飽和水を伴って供試管内を上昇し、セパレータを経て、凝縮器内で復水した流量を示す。図(a)~(e)はそれぞれ管内径 $D=25.75, 21.70, 16.40, 12.90, 10.35\text{mm}$ を用いて得られた測定結果である。実験条件は、圧力 $P=60\sim 83\text{mmHg}$ ($0.082\sim 0.113\text{ata}$)、蒸発器上面からの初期水位 $L_w=100, 50, 0\text{mm}$ ($\phi=0.095, 0.048, 0.0$) である。

同図から、管内径の変化が V_w 対 q 曲線に与える傾向

として本実験範囲内で次のことが指摘できよう。(1)揚水量 V_w のピーク値は管内径の減少とともに減少する。(2) V_w 対 q 曲線は管内径の減少とともに q の値の小さい方へ全体的に移行する。(3) V_w の値がゼロとなる上限の熱流束 ($L.H.F.$) の値も管内径の減少とともに小さくなる。(4)管内径 $D\leq 16.4\text{mm}$ であつ水面の高さ $L_w=0\text{mm}$ (浸水率 $\phi=0.0$) の場合、 V_w の値はゼロとなり揚水しない。

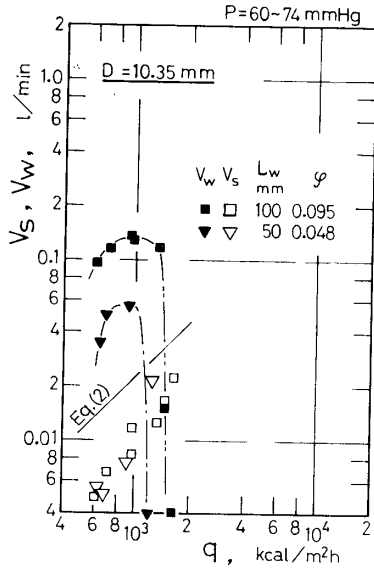


Fig. 2 (e) D=10.35mm

上記の関係を一層明確にみるため、 $L_w=100$ と 50mm とについて、 V_w 対 q 曲線に与える管内径の差異による影響を示したのが図3(a)および(b)である。両図から明らかかなように、 V_w 対 q 曲線は管内径の減少とともに、 q の値の小さい方へ移行し、さらに V_w の極大値も減少する。

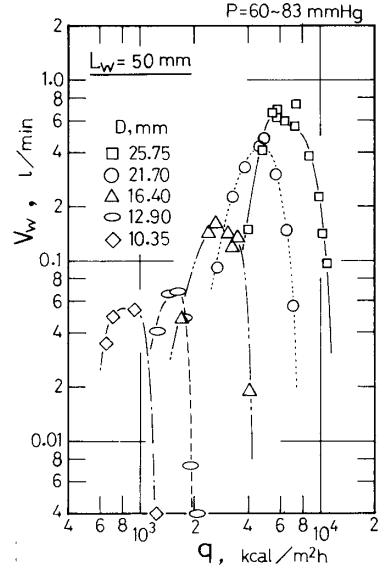


Fig. 3 (b) $L_w=50\text{mm}$

た値を示したものである。

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

ここに、 r は蒸発熱で供試管の圧力に対応してとる。蒸発器に戻ってく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みられる。

4.3 V_w 対みかけの蒸気速度 j_g の関係に与える管内径の影響と流動様式

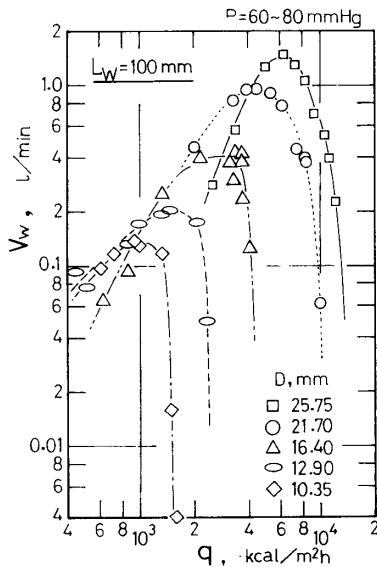
みかけの蒸気速度 j_g は管内圧力に対応する蒸気の比容積 v'' を用いて次式から算出した。

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

ここに、 G_s は復水の流量、 F_{Ts} は管の断面積である。

図4は、揚水流量 V_w をみかけの蒸気速度 J_g に対して示したもので、図3(a)に示されている測定値の横軸 q の代りに j_g をとって示した。実験条件は $P=60\sim 80\text{ mmHg}$ 、 $L_w=100\text{ mm}$ である。同図から、揚水量の極大値に対応する j_g の値は管内径の値の減少によって、 $40\sim 60\text{ m/s}$ から $20\sim 40\text{ m/s}$ へ移行している。また、揚水流量がゼロとなる上限の j_g の値は 110 m/s から 50 m/s 減少している。

図4中には、揚水時に供試管内を流動する二相流の流動様式の分類¹⁾を観察に基づいて記号で記入した。I.F. は間欠揚水の流れ、S.&F.F. は遊動波流とフロス流とが交互に出現する流れを示す。S.F., D.F., D.&R.F. およびR. & N.F. は環状流に属し、それぞれ、遊動波流、擾乱波流、擾乱波流とリップル流とが交互に現われる流れおよびリップル流と液膜破断の流れとが交互に現われる流れを示す。全流動領域にわたって、水位は



(a) $L_w=100\text{mm}$

Fig. 3 Effect of the tube diameter

復水流量 V_s と q の関係は図2中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ものとして次式で算出し

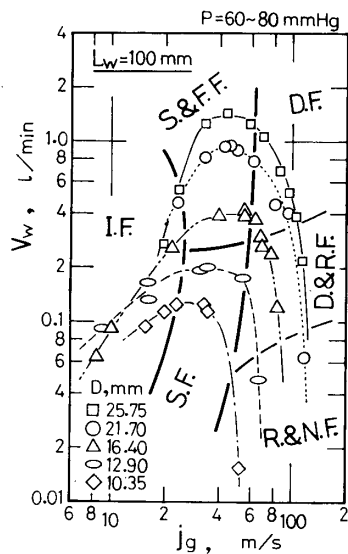


Fig. 4 V_w against j_g

蒸発器とレベルタンクの間でU字管変動を伴っているため、安定した定常な流れは現れ難く、揚水流量が比較的多い流れと少ない流れとが交互に出現する。揚水流量が多い流れはフロス流であった。しかし、管内径が13mm程度以下で、さらに $L_w \leq 100\text{mm}$ の条件下では全揚水範囲にわたってフロス流は出現しなかった。

図5はたて軸に揚水流量 V_w と復水流量 V_s との比 ζ

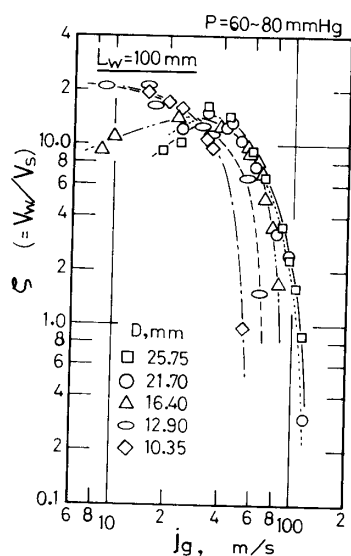


Fig. 5 $\zeta (=V_w/V_s)$ against j_g

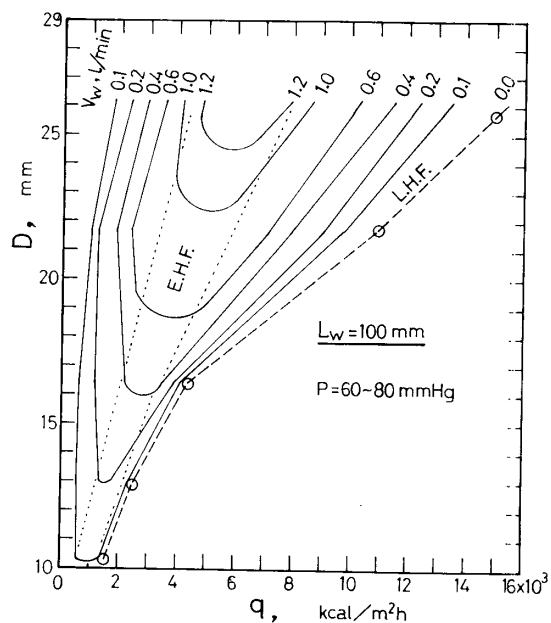
をとり、 j_g に対してプロットしたものである。揚水効率に相当する値である。

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

揚水流量比の曲線も管内径の減少とともに j_g の値の小さい方へ移行している。図4の V_w の値が極大値を示す点の j_g の値は10ないし20となっている。

4.4 有効熱流束 E.H.F. に及ぼす管内径の影響

図3(a)の V_w 対 q の関係から、揚水流量曲線の極大値に対応する有効熱流束¹⁾の傾向を明らかにするため、等揚水流量線図に引き直したものが図6である。等揚水



E.H.F. : effective heat flux

L.H.F. : limited heat flux

Fig. 6 Diagram of equal flow rate on V_w

量線は管内径の影響を強く受けることがうかがえる。同図中の点線の範囲が最大揚水量を与える有効熱流束 E.H.F. である。また、破線で結んだ線は揚水流量がゼロになる上限の熱流束 L.H.F. を示したものである。

E.H.F. 線および L.H.F. 線は共に管内径の影響を強く受け、管内径の減少とともに熱流束 q の値の小さい方へ移行する。つまり、管内径が小さくなるにつれて揚水し得る熱流束の範囲と値は急速に減少する。

有効熱流束に関するパラメータとして、前報¹⁾において圧力と浸水率の影響が明らかにされた(前報図9および図12)。それらと上述の管直径の影響などを考慮し、有効熱流束の中央値を与える実験式として次式を提案する。

$$q_c = 17.4 D^{2.05} \cdot P^{0.3} \cdot \varphi^{-0.06} \quad (5)$$

ここに、 D は管内径 mm、 P は圧力 ata、 φ は浸水率である。式(5)の実験範囲は $D = 10.35 \sim 25.75\text{mm}$ 、 $P =$

0.03~0.14 ata (22.0~104.0mmHg), $\varphi = 0 \sim 0.286$
($L_w = 0.0 \sim 300\text{mm}$) である。

図7は式(5)の検定結果を示したものである。たて軸に

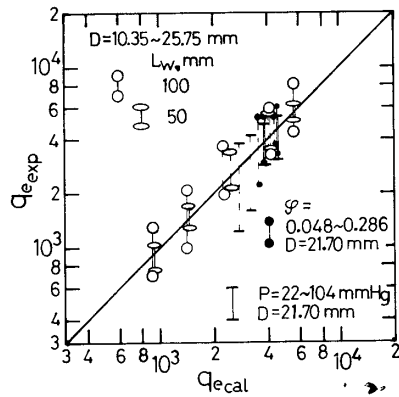


Fig. 7 Empirical correlation for effective heat flux

実験値をとり横軸に式(5)から計算される q_{ecal} をとってプロットした。本実験条件下のすべての点をプロットしたもので、式(5)はそれらの点をすべて許容している。

5. あとがき

減圧された純水を温水を用いて加熱沸騰させ、二相流による自然循環の実験を行い、その循環流量に与える管直径の影響を調べた。その結果を要約すると次のようである。

(1) 揚水量対熱流束の関係は管直径の相違によってかなり強い影響を受ける。管直径が減少すると揚水量、有効熱流束および上限の熱流束がともに減少する。

(2) 管直径が13mm程度ないしそれ以下で、さらに $L_w \leq 100\text{mm}$ の条件下では、揚水流量に効果的なフロスは出現し難い。

(3) 管直径が20mmないしそれ以下で、 $L_w < 50\text{mm}$ の条件下では、揚水流量は熱流束の値の大小にかかわらずゼロとなる。

(4) 本実験の範囲内で、有効熱流束を与える次の実験式が得られた。

$$q_e = 17.4 D^{2.05} \cdot P^{0.3} \cdot \varphi^{-0.06}$$

上式の適用範囲は； $D = 10.35 \sim 25.75\text{mm}$, $P = 0.03 \sim 0.14 \text{ ata}$, $\varphi = 0 \sim 0.286$ である。

終りに、実験の遂行に協力された内田総一（陸上自衛隊技術課）、山県郁夫（山口県土木課）および田中俊之（新明和工業）の諸氏に感謝する。なお、本研究費の一部は昭和53年度文部省科学研究費一般研究C（255078）によるものである。謝意を表したい。

文 献

- 1) 中里見, 川上, 宇部工業高専研究報告, No.25 (昭和54-3), P. 35.

(昭和55年9月1日受理)