二相二重管熱サイフォン内の流動と熱伝達* (入口サブクール度の影響)

吉田正道^{*1}, 井村英昭^{*2}, 一法師茂俊^{*3}

The Flow and Heat Transfer in Two-Phase Double-Tube Thermosyphons (The Effect of Subcooling)

Masamichi YOSHIDA, Hideaki IMURA, and Shigetoshi IPPOHSHI

An experimental study was performed to investigate the effect of subcooling on the flow and heat transfer in two-phase double-tube thermosyphons with three types of inner tubes using water, ethanol and Freon 113 as the working fluids. The same experiment for a single-tube thermosyphon was also carried out for comparison. As a result, a correlating expression for the heat transfer coefficients in two-phase double- and single-tube thermosyphons was presented. The expression presented by taking account of subcooling and the properties of the working fluids, agreed well with the experimental data. The critical heat flux increased slightly with the increase in the degree of subcooling, and the rate of increase for the double-tube thermosyphon was bigger than that for the single-tube one. The circulation mass velocity first increased and then decreased, as the heat flux increased. After that, it increased again at a certain heat flux. This behavior was observed for both saturated and subcooled boiling. However, this curve was shifted to a larger heat flux direction as the degree of subcooling increased.

Key Words: Thermosyphon, Boiling, Heat Transfer, Subcooling, Double-Tube, Two-Phase, Critical Heat Flux, Circulation Mass Velocity

1. 緒 言

熱サイフォン内に沸騰が発生する二相熱サイフォンはウィックレスヒートパイプとも呼ばれ、廃熱回収用熱交換器、電子機器の冷却など多くの応用が考えられ、また実用に供されている⁽¹⁾。しかし、熱サイフォン管が長くなると、管内の流れが気液対向流であるために、フラiddingが発生し、比較的低い熱流束で伝熱限界に達する⁽²⁾。そこで、熱サイフォンの加熱管内にもう一つの管を挿入し、二重管にすると(底部にすきまを設ける)、内管内を液体が下降し、環状流路を沸騰流が上昇するために、作動流体の流れが円滑になると同時に限界熱流束を増大させることができる。特に長尺の熱サイフォンの場合、二重管熱サイフォンは通常の単管の場合より優れた伝熱特性を持つ。したがって、長尺が要求される地熱の抽出にこの二相二重管熱サイフォンを応用することが提案され、研究が行われている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

著者らは二相二重管熱サイフォン内の流動と熱伝達

に関して基礎的研究を行うことを目的とし、熱伝達係数および限界熱流束へ及ぼす内管上端部形状の影響を調べ⁽⁶⁾、さらにサイフォン管内の循環流量を実測し熱伝達係数との関係について明らかにした⁽⁷⁾。しかしながら、従来の研究は飽和沸騰条件での実験が多く、サブクール沸騰における熱伝達特性を広範囲に調べた報告は見あたらない。そこで本報告では、作動流体として、水、エタノールおよびフロン 113 (R 113) を用い、3種類の上端部形状を持つ内管を用いた二重管および比較のために単管も含めた二相熱サイフォンについて、入口温度がサブクールされた場合の沸騰の実験を行い、サブクール度が限界熱流束、熱伝達係数および管内循環流量に及ぼす影響を系統的に調べた結果を報告する。

2. 記 号

C_{pt} : 定圧比熱 J/(kg・K)

d : 管直径 m

G_0 : 環状部での質量速度 kg/(m²・s)

r : 蒸発潜熱 J/kg

h : 熱伝達係数 W/(m²・K)

h_c : 修正熱伝達係数 W/(m²・K)

l : 加熱部長さ m

* 平成3年11月16日 九州・中国四国支部熊本地方講演会において講演、原稿受付 平成4年4月30日。

^{*1} 正員、有明工業高等専門学校 (〒836 大牟田市東萩尾150)。

^{*2} 正員、熊本大学工学部 (〒860 熊本市黒髪2-39-1)。

^{*3} 准員、熊本大学工学部。

- q : 熱流束 W/m^2
 q_c : 限界熱流束 W/m^2
 T_w : 加熱面温度 $^{\circ}\text{C}$
 T_{wc} : 修正加熱面平均温度 $^{\circ}\text{C}$
 T_{wm} : 加熱面平均温度 $^{\circ}\text{C}$
 T_{in} : 入口温度 $^{\circ}\text{C}$
 ΔT_{sub} : サブクール度 $(T_{\text{sat}} - T_{in})$ $^{\circ}\text{C}$
 ρ : 密度 kg/m^3

添字

- g : 気体
 l : 液体
 sat: 飽和状態
 sub: サブクール状態

3. 実験装置と方法

本実験に使用した実験装置は、飽和沸騰の場合の伝熱特性および管内流動に関する実験に使用したものと同一であり、前報⁽⁶⁾⁽⁷⁾に詳述したので重複を避けるが、主な寸法はサイフォン管の内径が22 mm、長さが800 mmで、黄銅で作られている。実験方法についても、熱サイフォン入口流体温度を所定の値に設定するために貯槽内に設置された冷却コイルの流量および加熱用ヒータの電力量を調節する操作がさらに必要となるだけで、その他は飽和沸騰の場合と同様である。

4. 実験結果および考察

4.1 加熱面温度の軸方向分布 表1に伝熱特性に関する実験の範囲を示す。表1中、Sは単管形熱サイフォンを表し、他の記号は図1に示す内管形状を表す。

図2はエタノールの場合（飽和温度78.5 $^{\circ}\text{C}$ ）のS形およびD.T形の加熱面温度の軸方向分布を示しており、縦軸は管底からの距離である。低熱流束域（実線）においては、S形の場合、管内流動が上昇気泡と下降液体の対向流であるため、管上部でサブクール度の影

表1 実験範囲

Working fluid	Type	Heat flux (W/m^2)	Subcooling (K)
Water	S	$0.27 \sim 9.3 \times 10^4$	0, 5, 10, 15, 20
	D,S	$0.26 \sim 9.3$	
	D,T	$0.27 \sim 9.5$	
Ethanol	S	$0.27 \sim 2.9$	
	D,S	$0.27 \sim 5.1$	
	D,T	$0.27 \sim 9.4$	
R113	S	$0.29 \sim 1.6$	
	D,S	$0.29 \sim 2.3$	
	D,T	$0.28 \sim 6.3$

図1 内管形状の詳細

(a)

(b)

図2 加熱面温度の軸方向分布

響が認められる。しかし、D.T 形の場合は管下端部からサブクールされた液体が流入するため、加熱管下部から中部にかけて壁温の上昇が顕著に現れ、サブクール度が大きい場合、飽和温度以下になる場合がある。この管下端部から中部にかけて壁温が増加している部分は、非沸騰領域であり、その極大値近傍が沸騰開始点と考えられ、サブクール度の増加とともに沸騰開始点が管上方へ移動し、非沸騰領域が広がる。しかし、高熱流束域(破線)になると、S 形および D.T 形とも十分発達した沸騰状態となり、サブクール度の影響はほとんど認められなくなる。

4.2 限界熱流束 本実験における伝熱限界は加熱面温度の一部が各作動流体の飽和温度の 2 倍を超えて増加し続ける場合とし、その直前の熱流束を限界熱流束とした。また表 1 に示した実験範囲において、実験装置の制限上、限界熱流束値が得られない場合もあった。

楠田・井村⁽⁸⁾ は単管形二相熱サイフォンの限界熱流束に対して、サブクール度を考慮した無次元整理式を提出している。それによると、サブクール沸騰における限界熱流束は次式で表される。

$$\frac{q_{c,sub}}{q_c} = 1 + 1.25 \frac{d}{l} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.8} \frac{C_{pl} \Delta T_{sub}}{r} \dots\dots\dots (1)$$

ここで q_c は飽和沸騰における限界熱流束であるが、ここでは Imura ら⁽²⁾ が提出した式によって計算した。図 3 に本実験で得られた R 113 の場合の限界熱流束のデータを式(1)で整理した結果を示す。S 形の場合、本実験値は楠田・井村の式とほぼ一致しており、サブクール度の増加とともにわずかに増加する傾向を示す。D.S 形の場合は飽和沸騰においては S 形とほぼ同じ値を示すが、サブクール度の増加とともに S 形に比較してより大きな値を示すようになる。これは飽和沸

騰の場合、前報⁽⁶⁾ で報告したように内管上端部で上昇気泡による流入障害が起こり作動流体の円滑な循環が妨げられるが、貯槽内流体がサブクールされている場合、上昇気泡の凝縮が起こり流入障害が抑制され循環が円滑になって二重管挿入の効果がある程度現れたものと思われる。D.P 形および D.T 形の場合も S 形と同様にサブクール度の増加にともなって限界熱流束値は増加するがその増加傾向は D.S 形と一致する。そして、限界熱流束の値は、S 形の場合の 4 倍程度の値を示す。なお、水およびエタノールの場合、S 形および D.S 形については R 113 とほぼ同様の傾向を示した。また D.P 形および D.T 形の限界熱流束値は実験装置の制限で得られなかった。

4.3 熱伝達係数の整理 図 4 (a)～(i) に D.P 形を除く全実験範囲の熱伝達係数と熱流束の関係を示す。D.P 形のデータは D.T 形とほぼ等しいため図を省略した。ここで熱伝達係数 h は次式で定義した。

$$h = q / (T_{wm} - T_{in}) \dots\dots\dots (2)$$

入口温度 T_{in} は D.T 形の場合、内管入口で測定したが、S 形および D.S 形の場合は入口部で上昇流の影響が著しく、液温が大きく変動するため、貯槽内液温を適正に表し、温度変動のもっとも少ない位置(入口部より約 20 mm 上方、管中心軸より半径方向に約 60 mm)を選んで測定した。なお、D.P 形の場合の測定位置も S 形および D.S 形と同様である。また図 4 中には比較のためプール沸騰に関する Stephan-Abdelsalam⁽⁹⁾ の熱伝達整理式を実線で示した。各図において、サブクール度の増加とともに式(2)の T_{in} が減少するため、同じ熱流束で h は低い値を示している。

これまで二相二重管熱サイフォンの熱伝達係数に関してサブクール度の影響を考慮にいたした整理式は提出されていない。そこで本報では作動流体の物性値およびサブクール度を考慮した熱伝達整理式の提出を試みた。

楠田・井村⁽¹⁰⁾ は単管形熱サイフォンに関する熱伝達整理式を提出しており、その場合の熱伝達係数を次式のように定義している。

$$h_c = q / (T_{wc} - T_{sat}) \dots\dots\dots (3)$$

ここで T_{wc} は飽和温度以上の加熱面温度の平均値であり、式(3)は低熱流束域における非沸騰部分の存在を考慮した式になっている。図 5 (a) および図 5 (b) に式(3)を用いて整理したエタノールの S 形および D.T 形の熱伝達係数整理結果を示す。なお、楠田・井村⁽¹⁰⁾、Stephan-Abdelsalam⁽⁹⁾ および狭いすきまにおける沸騰熱伝達に関する石橋⁽¹¹⁾ の各熱伝達整理式を

図 3 限界熱流束の無次元整理

比較のため図5中に示している。S形およびD.T形とも中高熱流束域においてはかなりよくまとまっており、各整理式とよい一致を示すが、低熱流束域では、サブクール度の増加とともにばらつきが大きくなる。これは、サブクール度が大きい場合、低熱流束域においては、加熱面上で非沸騰部分が大部分を占め、飽和温度以上の加熱面温度の平均値 T_{wc} を使用しても、 T_{wc} の値が沸騰領域の壁温を適正に表さないためと思われる。他の作動流体の場合も同様の傾向が認められた。したがってこの整理法では低熱流束域のデータを

十分に整理できない。

そこで、図4(a)~(i)においてサブクール沸騰のデータが各作動流体および内管形状に対してほぼ直線を示し、またその傾きが飽和ブール沸騰の Stephan-Abdelsalam⁽⁹⁾ の式にほぼ等しいことに着目し、式(2)で定義されるすべてのサブクール沸騰熱伝達係数のデータを Stephan-Abdelsalam⁽⁹⁾ の式より得られる熱伝達係数 h_{sat} にサブクール度と物性値の影響を考慮にいたした式を用いて整理することを試みた。その式として、例えば、限界熱流束において、サブクール

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

(h)

(i)

図4 熱伝達係数と熱流束の関係

と飽和沸騰の比が式(1)に示すような形の式で整理できることを考慮して、式(4)を考え、係数 C および指数 m, n の値を実験データより決定した。

$$h_{\text{sub}} = \frac{h_{\text{sat}}}{1 + C(\rho_l/\rho_g)^m (C_{pl}\Delta T_{\text{sub}}/r)^n} \quad \dots\dots (4)$$

ここで、 h_{sub} および h_{sat} は式(2)で定義される熱伝達係数のサブクールおよび飽和の場合の値であり、 h_{sat} は Stephan-Abdelsalam の式に q を代入して算出し

た。その結果、 m, n および C の値は各内管形状に対してかなり近い値を示したため、内管形状および作動流体にかかわらず、すべてのデータを最もよく整理できる値として、 $m=0.65, n=0.9$ および $C=0.4$ を得た。なお、飽和沸騰の場合、Stephan-Abdelsalam⁽⁹⁾ の式と本実験より得られた熱伝達係数のデータの比較は

図 5 修正加熱面平均温度を用いた熱伝達係数の整理

図 6 熱伝達係数の整理 (入口サブクール度の影響)

図4(a)～(i)に示すように水およびエタノールのS形およびD.S形〔図4(a), (b), (d)および図4(e)〕の場合、傾きも異なり、実験データが大きな値を示す。したがって、この場合は計算値が実験値よりも控えめな値を与える。水およびエタノールのD.T形およびR113の場合は両者はかなりよい一致を示す。

(a)

(b)

(c)

図7 熱サイフォン管形状別の熱伝達係数の整理（作動流体の影響）

図6(a)～(d)に式(4)を用いて算出した熱伝達係数と熱流束の関係を示す。図6(a)および図6(b)はそれぞれ図5(a)および図5(b)に対応しているが、前述のように、S形の飽和沸騰のデータが大きいことを除いて、全熱流束域でかなりよく整理できる。また図6(c)は水のD.T形の場合であるが、低熱流束域のサブクール沸騰で傾きが小さくなっている。これは水の場合、他の作動流体と比較して比熱が大きいいため熱流束が小さい場合は加熱面上で非沸騰領域が広くなり、自然対流熱伝達が支配的になるためである。図6(d)はR113のD.T形の場合で、実験データが少し小さい値を示すが、比較的よくまとまっている。

図7(a)～(c)に本整理法を用い、横軸に h_{sat} をとってサブクール度が5～20°Cの全データについて内管形状別に熱伝達係数を整理した結果を示す。図7(c)のD.T形の場合、水のデータが低熱流束域でばらついているが、これは前述したように自然対流熱伝達が支配的になるためである。また、高熱流束域で、エタノールのデータとStephan-Abdelsalam⁽⁹⁾の式との一致が悪くなっているが、エタノールの場合、図4(f)および図6(b)において明らかなように実験データがStephan-Abdelsalam⁽⁹⁾の式よりも大きな傾きを持つためである。しかしながら、すべてのデータは、ほぼ±30%以内の範囲内でまとまり、二相二重管熱サイフォン内のサブクール沸騰熱伝達係数は単管の場合も含

表2 管内流量の実験範囲

Working fluid	Type	Heat flux (W/m ²)	Subcooling (K)
R113	D.T	0.28 ~ 5.8 × 10 ⁴	0
		0.26 ~ 5.9	5
		0.27 ~ 6.1	10
		0.41 ~ 4.1	15
Ethanol	D.T	0.27 ~ 9.4	0
		0.26 ~ 7.8	10

図8 質量速度に及ぼすサブクール度の影響

めて式(4)でかなりよく整理することができる。

4・4 循環流量 環状部の面積を基準にした循環質量速度 G_0 の実験範囲を飽和沸騰の場合⁽⁷⁾も含めて表2に示す。なお、 G_0 の測定方法については文献(7)に詳述している。図8はR113を作動流体として用いた場合の G_0 に及ぼすサブクール度の影響を横軸に熱流束をとって示したものである。著者ら⁽⁷⁾は飽和沸騰の場合の G_0 の値を測定し、 G_0 は q の増加とともに増加した後、減少し、その後再び増加することを報告した(図8内の●印)。サブクール沸騰の場合もそれぞれの曲線は、同様の傾向を示すが、サブクール度が大きくなるにつれて、熱流束の大きいほうへ移動している。これはサブクール度が大きいほど、顕熱として消費される熱量が大きくなり、したがって同じ熱流束においては発生蒸気量が減少し、循環駆動力が低下するために当然の結果と考えられる。また、再増加前の G_0 のピーク値はサブクール度の増加とともに減少しているが、再増加点の G_0 および再増加後のピーク値は増加する傾向を示す。さらに、すべての場合、 G_0 の再増加後は管内流速測定用のマノメータ内の液柱が振動することから、管内は振動をとまなう流動となっていると思われる。この管内の流れについてはガラス観察部を持った実験装置によって、流動状態の観察を行っており、別に報告を行った⁽¹²⁾。また、古寺ら⁽¹³⁾は自然循環ボイラをモデル化したループ形熱サイフォンを用いて、本実験と同様な振動流(不安定流動)の実験を行っている。なお、エタノールの場合もR113と同様の傾向が認められた。

5. 結 論

二相二重管熱サイフォン内のサブクール沸騰について実験を行い、入口サブクール度が限界熱流束、熱伝達係数および管内循環流量に及ぼす影響を3種類の内管を持つ二重管および単管熱サイフォンについて、3種類の作動流体(水、エタノールおよびR113)を用いて調べた。以下に得られた主な結果を示す。

(1) 各作動流体において、サブクール度が壁温分布に及ぼす影響は、単管形と二重管形を比較した場合、その内部流動状態の相違のために大きく異なり、その影響は低熱流束域で顕著に現れるが、高熱流束域にお

いてはほとんど認められない。

(2) R113を作動流体として用いた場合、サブクール度の増加とともに各内管形状において限界熱流束値はわずかに増加するが、その増加傾向は単管形より二重管の場合が大きい。

(3) 本実験の熱伝達係数を楠田・井村の提案した熱伝達係数の整理法を用いて整理すると、低熱流束域を除いて比較的よくまとまることが確認された。

(4) 本報で提出した入口サブクール度および作動流体の物性値を考慮した熱伝達係数整理式は、本実験のサブクール沸騰のデータをよく整理できる。

(5) 循環流量と熱流束の関係は飽和沸騰の場合と同様の傾向を示すが、サブクール度の増加とともに流量曲線は高熱流束側へ移動する。また、再増加前の流量のピーク値は減少するが、再増加点の流量および再増加後のピーク値は増加する傾向を示す。

以上、入口サブクール度の影響の概略が明らかになったが、本結果は加熱管の長さおよび直径、加熱管と内管の直径比を固定したままでの実験結果であり、より一般的な結果を得るためには、今後さらに上記のパラメータを変えて実験を行い、それらの影響を明らかにする必要がある。

最後に本研究に協力された、小笠原幸雄、柿塚真実、境和久、金崎憲一郎の諸君に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 日本ヒートパイプ協会編, 実用ヒートパイプ, (1985), 99, 日刊工業新聞社.
- (2) Imura, H., ほか3名, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **26**-8 (1983), 1181.
- (3) 白石, 地熱, **24**-1 (1987), 57.
- (4) 福迫・ほか2名, 第23回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1986-5), 439.
- (5) Imura, H. and Yoshida, M., *Prepr. 7th Int. Heat Pipe Conf.*, Minsk, USSR, (1990-5), D23.
- (6) 井村・吉田, 機論, **56**-532, B (1990), 3816.
- (7) 吉田・井村, 機論, **57**-536, B (1991), 1428.
- (8) 楠田・井村, 機論, **40**-332 (1974), 1082.
- (9) Stephan, K. and Abdelsalam, M., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **23**-1 (1980), 73.
- (10) 楠田・井村, 機論, **39**-319 (1973), 930 および 940.
- (11) 石橋, 機論, **34**-257 (1968), 150.
- (12) 井村・吉田・一法師, *Proc. 8th Int. Heat Pipe Conf.*, Beijing, China, (1992-9), A-2.
- (13) 古寺・ほか2名, 機論, **46**-407, B (1980), 1327.