垂直円管内の沸騰を伴う流動の可視化実験* (小質量速度, 小加熱熱流束の場合)

水野 知博^{*1}, 新井 隆景^{*2}
杉山 弘^{*2}, 内山 尚^{*3}

Visualization Study of Boiling Two-Phase Flows in a Vertical Circular Tube (The Case of Small Mass Velocity and Small Heat Flux)

Tomohiro MIZUNO, Takakage ARAI,
Hiromu SUGIYAMA and Takashi UCHIYAMA

The purpose of the present paper is to understand how boiling two-phase flow behaves in a vertical circular tube for the case of small mass velocity and small heat flux. Flow visualization study was made to investigate the effects of the mass velocity and heat flux on boiling two-phase flow in the tube. It has been found that the flow pattern and/or flow pattern transition is influenced by the inner diameter of the tube, and that the height of the dry-out point depends on the mass velocity, heat flux and inner diameter of the tube.

Key Words: Boiling Two-Phase Flow, Flow Visualization, Vertical Tube, Ground Source Heat Pump, HCFC-22

1. 緒 言

寒冷地域において, 地中熱を熱源とし, 二重管構造の採熱管と HCFC-22 を冷媒とするヒートポンプシステムが考えられている⁽¹⁾。地中熱は, 熱源としてはエネルギー密度が低いので, 冷媒の質量速度を極めて小さくする必要がある(従来は 500~1 000 kg/m²s 程度, 本研究で対象とする質量速度は従来の 1/100 程度)。したがってこのヒートポンプシステムにおいては, 質量速度が小さい場合における採熱管内の冷媒の沸騰流動特性がヒートポンプ性能を決める重要な要因となる。また, 採熱量を大きくするためには, 採熱管の伝熱面積を大きくする必要があり, その結果, 比較的太い管を用いる必要もある。

そこで, 著者らはこれまで, 垂直二重管構造の採熱管のモデル実験を行い, 比較的管径の大きい場合について, 伝熱特性を把握⁽¹⁾するとともに二重管の流路すきまが沸騰流動特性に与える影響を明らかにしてきた⁽²⁾。その結果, 二重管構造の採熱管は単管に比べて

伝熱性能がよいことが判明した⁽¹⁾。しかし, 比較された単管のデータ⁽³⁾は大質量速度, 小直径(管直径 10 mm 程度)の場合である。一方, 垂直な採熱管内の沸騰を伴う流動様式に関する従来の研究においては比較的管断面積の小さい場合について行われており⁽⁴⁾, 地中熱を熱源とする場合に用いられると考えられる比較的大きな直径をもつ管に対する実験データはほとんど見られず, 不明な点が多い。また, 本研究で対象としているヒートポンプシステムでは, 採熱管内において液体が蒸発してなくなる位置(以後ドライアウト位置と呼ぶ)がシステム運転上極めて重要となるが, ドライアウト位置に関する研究は著者らの知り得る限り知見しない。さらには, 二重管の流路すきまが沸騰伝熱現象に及ぼす影響の研究⁽²⁾から, 流路すきまが沸騰流動現象に影響を及ぼすことが明らかになっているが, 単管の場合, 管径が比較的大きい場合においては管径が沸騰流動の特性に与える影響が十分に明らかになっているとは言えない。

以上の理由から, 二重管の沸騰伝熱現象をより深く理解する目的も含めて, 垂直円形単管を採熱管として用いる場合において, 小質量速度, 小加熱熱流束の条件における沸騰伝熱現象を対象として, 管径の影響を含めてその流動の様相の解明を行った。具体的には,

* 原稿受付 1995 年 6 月 26 日。

^{*1} 正員, 室蘭工業大学大学院 (〒050 室蘭市水元町 27-1)。

^{*2} 正員, 室蘭工業大学。

^{*3} 学生員, 室蘭工業大学大学院。

管径、質量速度、加熱熱流束を変化させて流れの可視化を行い、流動の様相の変化を観察するとともに、本システムで重要と考えられる沸騰面の位置を測定し、沸騰面の位置に及ぼす種々のパラメータの影響を明らかにした。

2. おもな記号

D_{in} : 管内径

D_{out} : 管外径

G : 質量速度

g : 重力加速度

q : 加熱熱流束, $q = q' / \pi D_{out}$

q' : 単位長さ当たりの通過熱量

$$2\pi\Delta T / \{(1/\lambda)\ln(D_{out}/D_{in})\}$$

T : 温度

ΔT : 管の内外壁の温度差

z : 管底からの距離

z_d : ドライアウト位置

λ : 熱伝導率

χ_i : 管底部での冷媒の熱力学的平衡クオリティ

3. 可視化実験装置および実験方法

図1は可視化実験装置の概略を示している。実験装置は可視化可能なテストセクションを有する冷媒循環系(HCFC-22使用)、加熱水循環系(水を循環)、および記録系により構成されている。テストセクションはパイレックスガラス製で、長さは1.08 mであり、内径8, 15, 22, 27 mmの4種類の管を実験に供した。加熱水循環系は、テストセクションである単管を垂直に設置してある透明アクリル製水槽と、2 kWの水中ヒータを設置した加熱槽よりなり、それらは循環ポンプにより連結されている。水中ヒータはサーモスタットにより水槽内の水温を一定に保つように制御されている。なお、水槽内の真ちゅう製フランジ、および配管は、循環水から熱絶縁されている。また、冷媒循環系の冷凍機には、圧縮機の潤滑油が可視化部であるテストセクション内に混入し、フォーミングを起こさないように、オイルセパレータを圧縮機と凝縮器の間に直列に2個設置した。

実験は、前述した4種類の内径をもつ単円管に対して、水槽内の水温と冷媒の質量速度を表1に示す範囲で変化させた。テストセクション入口における熱力学的平衡クオリティ(以降、本文中のクオリティは熱力学的平衡クオリティの意味で用いる)は図1のBの膨張弁で等エンタルピー変化と仮定し、膨張弁上流のサブクール部における温度と圧力の測定結果と状態線図

Table 1 Test condition

Water Temperature	293 - 318	K
Mass Velocity	3.0 - 55.6	kg/m ² s
Quality at Inlet of Test Section	0.16 - 0.24	
Heat Flux	6.1 - 17.5	kW/m ²
Pressure at Inlet of Test Section	0.17 - 0.44	MPa

A: Test section	I: Accumulator
B: Expansion valve	J: Test pond
C: Flow meter	K: Circulating pump
D: Dryer	L: Heating water pond
E: Reservoir	M: Heater
F: Condensor	N: Thermo recorder
G: Oil separator	P: Pressure gauge
H: Compressor	T: Thermocouple

Fig.1 Experimental apparatus

から求め、その値は、 $\chi_i = 0.16 \sim 0.24$ であった。すなわち、テスト部入口のクオリティがほぼ一定の条件で実験を行った。加熱熱流束は、

$$q = q' / \pi D_{out}$$

$$q' = 2\pi\Delta T / \{(1/\lambda)\ln(D_{out}/D_{in})\}$$

より求めた。なお、 ΔT は正しくは管内外壁の温度差であるが、本研究では、管壁の温度が測定できなかったため、 ΔT として水槽内の水の温度とテストセクション内の管底における冷媒の温度との差を用いた。おもな実験条件の範囲を表1に示す。流動の様相はスチールカメラ、8ミリビデオカメラにより観察された。

4. 実験結果および考察

4.1 流動の様相に及ぼす管径の影響 図2は、管内径 $D_{in} = 8$ mmの場合における代表的な流動の可視化結果を示している。実験条件は質量速度 $G = 30.0$ kg/m²s, 加熱熱流束 $q = 14.4$ kW/m²の場合である。図より、管底付近では気泡流であるが、蒸発が進行してクオリティが増加するに伴い、 $z = 100$ mm付近で

はスラグ流, $z=200$ mm 付近では環状流となり, $z=250$ mm 付近で噴霧流となり, $z=270$ mm 付近で冷媒が観察できなくなる状態(以後ドライアウトと呼び, その位置をドライアウト位置あるいは沸騰位置とする。ドライアウト位置の測定精度は ± 20 mm 程度である)になることが観察できる。このようにテスト部入口からドライアウトにいたる流動の変化が, 気泡流→スラグ流→環状流→噴霧流→ドライアウトとなる。これは従来の結果と一致する⁽⁵⁾。

図3は, 管内径 $D_{in}=15$ mm における流れの可視化結果の代表的な場合を示している。実験条件は, 質量速度 $G=10.6$ kg/m²s, 加熱熱流束 $q=7.8$ kW/m² である。図より, 管底付近における流動の様相は気泡流であり, $z=100$ mm および $z=200$ mm 付近では気相

と液相が複雑に混合したチャーン流であると分類できる。また, ドライアウト位置付近の流動の様相もチャーン流であることがわかる。すなわち, 図2に示した管内径 $D_{in}=8$ mm の場合のように, 明白な環状流へ, さらには噴霧流へという遷移は観察されない。ビデオ撮影の結果を詳細に観察すると, 気相の多い部分とそれに続く気相の少ない部分とが交互に管内を上昇することが観察できた。図4は, 管内径 $D_{in}=22$ mm における流れの可視化結果の代表的な場合を示している。実験条件は質量速度 $G=7.3$ kg/m²s, 加熱熱流束 $q=6.6$ kW/m² の場合である。図より, 管底付近の流動の様相は気泡流であるといえる。 z が増加すると蒸発が進行するので, クオリティが増加するが, 流動の様相はほとんど変化せず, 気泡流のまま, ドライアウトに

Fig. 2 Flow visualization of boiling flow ($D_{in}=8$ mm)

Fig. 3 Flow visualization of boiling flow ($D_{in}=15$ mm)

Fig. 4 Flow visualization of boiling flow ($D_{in}=22$ mm)

Fig. 5 Flow visualization of boiling flow ($D_{in}=27$ mm)

至ることがわかる。

図5は、管内径 $D_{in}=27$ mm の場合の可視化結果の代表的な場合を示している。実験条件は質量速度 $G=6.0$ kg/m²s, 加熱熱流束 $q=7.6$ kW/m² の場合である。図より、管底からドライアウト位置まで気泡流であることがわかる。これは図4の場合と同様である。

従来の研究では、クオリティの増加に従い、一般に、気泡流、スラグ流、環状流、噴霧流と流動様式が変化するとされているが⁽⁵⁾、そのような流動様式の変化が観察できた管径は管内径 $D_{in}=8$ mm の場合のみであり、管径が比較的大きい場合 ($D_{in}=15, 22, 27$ mm の場合) はクオリティが増加しても流動の様相は変化しないこと(ただし、実験条件が本実験と著しく異なる場合は不明)。また、チャーン流が観察される条件も管径が $D_{in}=15$ mm の場合に限られることがわかる。

管内径の変化によって、流動様式が変化する原因は、次のように推察することができる。内径が小さい場合は、管底や管内壁部より発生した気泡が、管内壁により動きが束縛され、自由に動き回ることができず、気泡同士が合体、成長しやすくなる。しかし、内径が大きい場合は、気泡の運動が管壁によってあまり束縛されないため、気泡同士の合体が起こりづらくなるためであろう。

4.2 流動の様相に及ぼす加熱熱流束および質量速度の影響 4.1 節では管径が異なると流動様式も変化することが明らかとなった。しかし、流動の様相は加熱熱流束や質量速度にも影響を受けると考えられるので、本実験装置で実験可能な条件において加熱熱流束と質量速度を変化させて流動の様相を観察した。なお、流動様式の判定はビデオ撮影の結果を参考にしながら目視により行った。

図6は実験条件と流動様式の関係を図示したものである。○印は内径 $D_{in}=8$ mm の場合、△印は内径 $D_{in}=15$ mm の場合、□印は内径 $D_{in}=22$ mm の場合、◇印は内径 $D_{in}=27$ mm の場合である。図中の各点は本研究で行った実験条件を示している。白ぬき記号は管底からドライアウトに至る流動の様相が気泡流を保ったままドライアウトする場合、灰色は気泡流からチャーン流と変化しドライアウトする場合、黒く塗りつぶした記号は気泡流からスラグ流、環状流、噴霧流と変化してドライアウトする場合を示している。図6から管内径 $D_{in}=8$ mm の場合はすべての実験条件において気泡流からスラグ流、環状流、噴霧流を経てドライアウトに至ることがわかる。管内径 $D_{in}=15$ mm の場合では、実験を行ったすべての条件において、気泡流からチャーン流へ変化してドライアウトに至る。 $D_{in}=$

Fig. 6 Flow pattern map

22, 27 mm の場合は、気泡流のままドライアウトに至る。したがって、本研究の実験条件の範囲内では管径が一定ならば、質量速度 G や加熱熱流束 q が変化しても流動の様相は大きく変化しないこと、流動様式は、管径に依存することがわかる。しかし、 $D_{in}=15, 22, 27$ mm の場合の質量速度 G や加熱熱流束 q が著しく大きい場合の流動様式は不明である(本実験装置の性能の限界で、確認はできなかった)。

4.3 ドライアウト位置に及ぼす加熱熱流束、質量速度の影響 図7は、管内径 $D_{in}=8$ mm の場合の、加熱熱流束 q とドライアウト位置 z_d の関係を示している。パラメータは、質量速度 G であり、○印は $G=29$ kg/m²s を、□印は $G=37$ kg/m²s, △印は $G=55$ kg/m²s の場合を示している。ドライアウト位置の測定精度は前述したように ± 20 mm 程度であった。これは沸騰現象が非定常であるためとともに、気泡流、スラグ流、環状流などの流れの非定常性により、ドライアウト位置が変動していることによる。当然のことであるが、図7より、質量速度 G が一定ならば、加熱熱流束 q が大きいほど、ドライアウト位置 z_d は低くなる。また、加熱熱流束 q が一定ならば、質量速度 G が増加するとドライアウト位置 z_d は上昇することもわかる。

図8~10はそれぞれ管内径 $D_{in}=15, 22, 27$ mm の場合におけるドライアウト位置を図7と同様に整理して示したものである。管内径 $D_{in}=15, 22, 27$ mm の場合

Fig. 7 Relation between height of dry-out point and heat flux
($D_{in}=8$ mm)

Fig. 9 Relation between height of dry-out point and heat flux
($D_{in}=22$ mm)

Fig. 8 Relation between height of dry-out point and heat flux
($D_{in}=15$ mm)

Fig. 10 Relation between height of dry-out point and heat flux
($D_{in}=27$ mm)

におけるドライアウト位置 z_d に及ぼす加熱熱流束 q 、質量速度 G の影響は管内径 $D_{in}=8$ mm の場合と同様であることがわかる。

図 8～10 ならびに図 7 を比較すると、ほぼ同じ加熱熱流束 q と質量速度 G の実験条件に対しても、管径が異なるとドライアウト位置は異なることがわかる。例えば、質量速度 $G=10$ kg/m²s、加熱熱流束 $q=8$ kW/m² のときの管内径 $D_{in}=15$ mm と 22 mm の場合を比較するとドライアウト位置 z_d の値は、それぞれ管内径 $D_{in}=15$ mm の場合はドライアウト位置 $z_d=250$ mm、管内径 $D_{in}=22$ mm の場合はドライアウト位置 $z_d=570$ mm であり、両者は異なる(図 8, 9 参照)。

以上述べたように、ドライアウト位置 z_d は質量速度 G と加熱熱流束 q が変化すると変化し、また、管内径が変化しても変化する。このことは垂直二重管内の沸騰流動においても同様であった⁽²⁾。垂直二重管の

場合、ドライアウト位置 z_d はほぼ質量速度 G 、加熱熱流束 q および水力直径 D_h によって作られる無次元数 $GD_h g/q$ に比例することが判明している⁽²⁾。ここで水力直径 D_h は外管内径と内管外径との差である。そこで本研究においてもドライアウト位置 z_d を $GD_{in} g/q$ によって整理することを試みた。結果を図 11 に示す。

図より無次元のドライアウト位置 z_d/D_{in} は $(GD_{in} g/q)^n$ にほぼ比例することがわかる。最小二乗法によって各々の D_{in} について n を求めた結果を図中に示した。その結果 n は 1.4～1.8 程度の値を取ることをわかる。また、 n の値は管径が小さいほど大きい。 n が大きいことは、例えば n が小さい場合に比べて質量速度 G の変化に対してドライアウト位置がより大きく変化することを意味する。また、図 11 から、管内径 $D_{in}=15, 22, 27$ mm の場合はほぼ一つのグループにまとめることができ、管内径 $D_{in}=8$ mm の場合のみ、他

Fig. 11 Correlation between z_d/D_{in} and $GD_{in}g/q$

と異なることがわかる。このことは z_d/D_{in} と $GD_{in}g/q$ の関係が流れの様相に影響されることを示している。具体的には、環状流や噴霧流が観察される場合には無次元のドライアウト位置は、気泡流やチャン流の場合に比べて約3倍程度高くなると言える。

5. 結 言

垂直円管内の強制沸騰流動に対して、冷媒の質量速度と加熱熱流束が小さい場合について可視化実験を行った。本実験条件の範囲で得られたおもな結果を要約

すると以下のとおりである。

(1) 垂直単管内での冷媒の沸騰流動様式は管径の影響を受ける。具体的には、 $D_{in}=27, 22$ mm の場合には管底からドライアウト位置までほぼ気泡流であり $D_{in}=15$ の場合には気泡流からチャン流へ変化してドライアウトに至る。 $D_{in}=8$ mm の場合、気泡流、スラグ流、環状流、噴霧流と変化してドライアウトに至る。

(2) ドライアウト位置は、管径、加熱熱流束、質量速度に依存し、管底からドライアウト位置までの無次元距離 z_d/D_{in} は $(GD_{in}g/q)^n$ にほぼ比例する。

(3) z_d/D_{in} と $GD_{in}g/q$ との関係は沸騰流動の様相と関係があり、本実験では二つに分類できる。一つは気泡流あるいはチャン流の状態ドライアウトに至る場合で、他は、気泡流、スラグ流、環状流、噴霧流という流動様式の変化を伴ってドライアウトする場合である。

文 献

- (1) 西岡純二・杉山 弘・新井隆景, 地中熱ヒートポンプ用採熱管の伝熱特性に関する研究(二重管内上昇流の強制流動沸騰熱伝達実験: 小質量速度の場合), 機論, 59 560 B (1993), 1279-1284.
- (2) Mizuno, T., Sugiyama, H., Arai, T., Kame, T. and Nishioka, J., Visualization of Boiling Two Phase Flow in Vertical Annuli, 2nd International Conference on Multiphase Flow, 3 (1995), 5-9, KYOTO.
- (3) 堀政義・一色尚次, 一様加熱垂直管上昇流の限界加熱熱流束特性に関する研究, 機論, 46-409, B (1980), 1731-1741.
- (4) 佐藤俊・ほか3名, 管路流路飽和沸騰熱伝達に関する研究(第1報 加熱流路内気液二相流の流動様式), 機論, 38 310 (1972), 1478-1486.
- (5) 日本機械学会, 気液二相流技術ハンドブック, (1989), 2-3, コロナ社.