九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

密閉二相熱サイフォンの加熱限界

筒井，泰孝
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

岩橋，謙一
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

福田，研二
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

饒，燕飛
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

他

https://doi.org/10.15017/17323

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 15 (4), pp.359-365, 1994-03-01. 九州大学大学院総合理工学研究科
バージョン：
権利関係：

九州大学大学院総合理工学研究科報告
第15巻 第4号 359-365頁 平成6年3月

Engineering Sciences Reports, Kyushu University
(KYUSHU DAIGAKU SOGORIKOGAKU KENKYUKA HOKOKU)
Vol. 15, No. 4 pp. 359 - 365 March 1994

密閉二相熱サイフォンの加熱限界

筒井泰孝*・岩橋謙一*・福田研二***
饒　燕飛***・工藤和彦****・ヘル　クンチョロ**

(平成5年11月20日　受理)

Heating Limit of a Closed Two Phase Thermosyphon

Y. TSUTSUI, K. IWAHASHI, K. FUKUDA
Y. RAO, K. KUDOU and H. KUNCORO

In a closed two-phase thermosyphon, countercurrent flow which emerges in it results in a heating limit due to the occurrence of the flooding. Thus a double tube thermosyphon is designed which is a conventional single tube termosyphon with an inner tube inserted in order to control the occurrence of the flooding.

In previous works it was shown that, with Freon R113 as a working fluid, the heating limit for the double tube thermosyphon was largely increased than the conventional one. But in the case of water as the working fluid, the increase in heating limit was not confirmed.

In this work, experiments are performed with water and R113 as the working fluid, and flow patterns inside the thermosyphon are visually observed in detail. Then the relation between the flow patterns and the heating limit is revealed. The results are compared with those of privious works and some proposals for designing the optimum double tube thermosyphon are made.

1. 緒　　言

密閉二相熱サイフォンは，作動流体の相変化を利用するため，比較的小さな温度差で大量の熱輸送が可能な熱伝達素子である．特に近年，その優れた伝熱特性が注目され，廃熱回収用熱交換器や原子炉の冷却系への応用，またエレクトロニクスの分野でも LSI パッケージの冷却等への応用も考えられており，熱サイフォンの高熱負荷系での使用が期待されている．

従来の密閉単管型熱サイフォンにおいて加熱限界が生じる原因として，高熱負荷時に発生するフラッディング現象がある．著者らは，このフラッディングを回避し加熱限界を向上させるため，熱サイフォン内に内管（内部下降管）を挿入した密閉二重管型熱サイフォンの研究め進めてきた．そして作動流体がフロン113 (R113) の場合，上部が漏斗状の内管を用いると加熱限界が向上することを見いだした[1]．しかし，更に加熱限界を向上させるため作動流体に潜熱の高い水を用いた幾つかの実験では，未だ二重管型にしたことによる加熱限界の向上はみられていない．

そこで本報告では，密閉単管型と二種類の漏斗状内管を挿入した密閉二重管型について，断熱部より上部を可視化した実験を行い，作動流体として水および R113 を用いた場合についての流動様式の違い，およびそれが加熱限界に与える影響を調べた．更に本実験結果をもとに，これまでの著者らの実験についても検討を加えた．

2. 熱サイフォン可視化実験

2.1 実験装置及び実験方法

実験装置を **Fig. 1** に示す．加熱部は長さ 545mm，内径 13.3mm の SUS304 製で，そのまわりの電気ヒータにより加熱され，更に熱損失を補う為，断熱材をはさんで補償用ヒータが巻かれている．断熱部，凝縮部及び内管はパイレックスガラス製であり，凝縮部の周囲には水冷用ジャケットが設けられ水冷されている．断熱部は加熱部と凝縮部の管径の違いからテーパ状の構造を有し，それに合わせ内管上端も漏斗状となって

*エネルギー変換工学専攻修士課程
**エネルギー変換工学専攻修士課程
***エネルギー変換工学専攻
****工学部応用原子核工学科

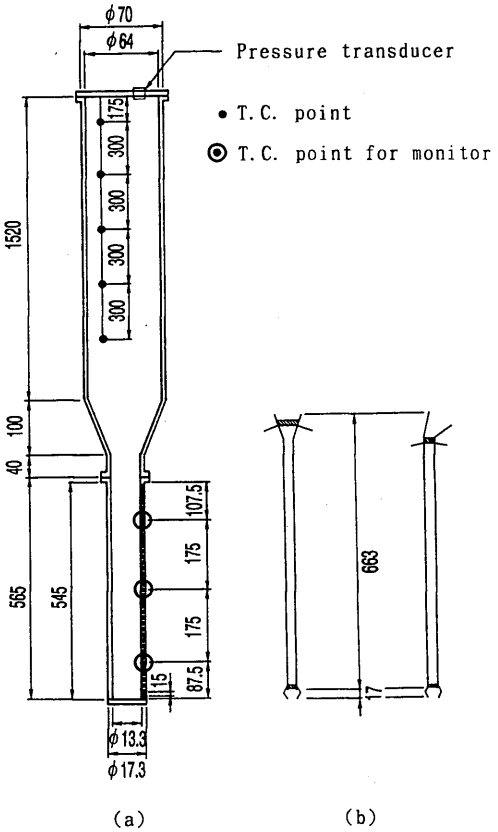

Fig. 1　Dimensions of (a) test tube and (b) inner tube

いる．内管にはその漏斗部が垂直な内管（TYPE1）と傾斜した内管（TYPE2）を用いる．温度測定にはC-A熱電対を用い，測定位置は加熱部外壁37点，凝縮部内部5点とした．さらに冷却ジャケット出入口にも熱電対を取り付け冷却水の温度を測定した．圧力測定にはストレインゲージ式圧力計を用い凝縮部上端に設置した．またマルチペンレコーダを用いて加熱部上部（下端から約440mm），中部（下端から約260mm），下部（下端から約90mm），凝縮部内部（上端から約1400mm）各1点の温度及び系内の圧力を連続的にモニターし定常状態の判定を行った．

実験は単管型と2種類の二重管型について充填率，冷却水温度を設定し，加熱入力をステップ状に増加させ，系内が定常状態に達したことを確認した後，小型多点温度記録計により温度測定を行い，また系圧力および加熱入力値を記録した．その際，流動様式を観察し，カメラ，ビデオ，スケッチにより記録を行った．これらの測定，観察を行った後，加熱量を増加させ，上記の手順を繰り返した．なお装置の保全上，加熱部外壁温度の最低1ヵ所が200℃を越えた時点で加熱を中止し，一連の実験を終了した．

実験パラメータの充填率，冷却水初期温度はそれぞれ（40％～130％），（20℃～60℃）の範囲内で設定した．ここで充填率は，大気圧下での加熱部容積に対する封入比をもって定義している．このため作動流体が水とR113では，大気圧下で同一充填率でも，真空に引かれた管内に充填した際には，比体積比の違いから試験部内の液位が異なる．さらにR113の場合にはその液位が圧力に大きく依存する．したがって水とR113の流動様式を比較する際には，試験部内の水位が同程度のものについて行った．

2.2　実験結果および考察

Fig. 2 に単管型，二重管型における断熱部の流動様式を示す．

Fig. 2 (a) は単管型であるが，断熱部下部のストレート部では，作動流体によらず壁面を流下する液相と中心部を上昇する気相の対向流となる．一方テーパ部では，作動流体が水の場合，上昇蒸気が凝縮液を激しく吹き上げ液溜まりは見られないが，R113の場合，気泡の体積が水に比べ小さく，吹き上がる液もほとんどないため液溜まりが存在する．これは相変化において発生する気相，液相の比体積比が水は10^3～10^4のオーダに対しR113は10^2のオーダとR113の方がかなり小さいためである．また作動流体によらず，充填率，熱流束が高いほど断熱部の液量が増加する．圧力の影響は水ではほとんど見られないが，R113の場合は試験内部の液量が圧力により大きく左右され，圧力が低いほど断熱部に現れる液量が増える．

Fig. 2 (b) にTYPE1の内管を使用した二重管型における断熱部の流動様式を示す．作動流体が水の場合は単管型の場合と同様，液溜まりは見られず，蒸気によって，内管上端以上に吹き上げられた液相が内管内に取り込まれると内部再循環が実現される．そして液の取り入れ量（循環量）が十分であるなら，断熱部下部の環状ストレート部では流動様式が対向流から上昇流と変化する．充填率が高くなると吹き上がる液量も増加し，それにともない循環量も多くなる．充填率40％の場合には断熱部以上に液が現れず内部再循環が実現されなかったが，充填率60％以上では内部再循環

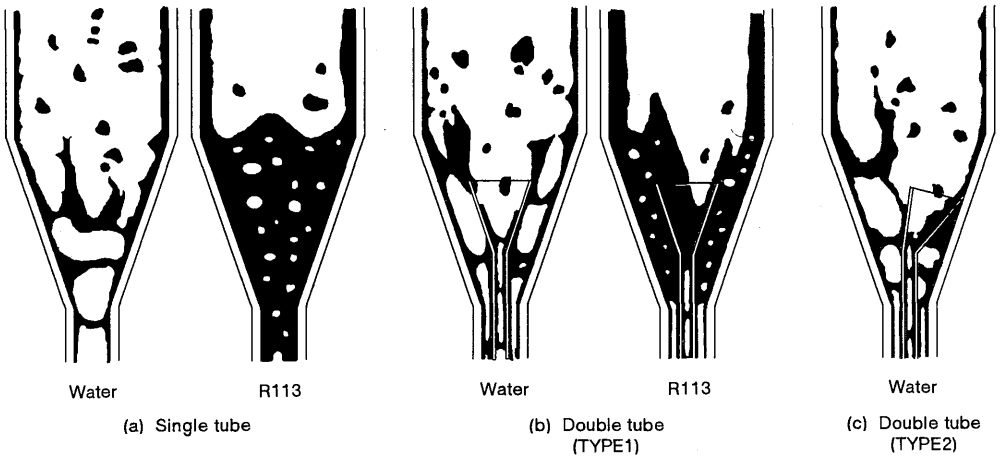

Fig. 2　Flow patterns in the adiabatic section

が完全に実現される様子が観察された．作動流体がR113の場合，単管型の場合と同様，圧力が低いほど断熱部に存在する液量が多くなり，内部再循環が実現されやすくなる．

以上よりTYPE1の内管を用いた場合，液溜まりが存在するような作動流体に対しては，その水位が内管上端を越えさえすれば内部再循環が確実に実現されることがいえる．しかし，液溜まりが存在しないような作動流体に対しては内管上端より上部に吹き上がった液相が内管内に連続的に取り込まれた場合に内部再循環が実現される．したがってこの場合内部再循環の実現は非常に微妙であるといえる．また液溜まりの形成には作動流体の液相と蒸気相間の比体積比が大きく影響し，比体積比の小さい作動流体ほど液溜まりが存在しやすく内部再循環の実現も容易となる．

Fig. 2 (c) にTYPE2の内管を使用した二重管型における断熱部内の流動様式を示す．TYPE2の内管は，作動流体が水の場合に観察された壁面付近の液相を連続的に取り入れることで，内部再循環を確実に実現させようとしたものである．断熱部のテーパ部では，傾斜した漏斗部が流動抵抗となり，この漏斗部側に液相が滞留し，反対側に液相，気相が吹き抜ける流動様式となる．したがって漏斗部側の液溜まりの液位が内管上端を越えたとき内部再循環が実現される．内部再循環が完全に実現された場合はTYPE1の場合と同様，断熱部下部のストレート部では気相，液相とも上昇流となる．充填率の影響もTYPE1の場合と同様，断熱部以上の液量に現れ，充填率が高いほど漏斗部傾斜側の液位が上昇し循環量が増加する．このようにTYPE1の場合と液相の取り入れ方が異なるため，充填率が60%ではTYPE1は内部再循環が実現したが，TYPE2では液溜まりの液位が内管上端まで上昇せず内部再循環は実現されなかった．

Fig. 3 (a)～(d) に作動流体が水およびR113の場合の限界熱流束を示す．なお本実験では，加熱部外壁温度の最低1ヵ所が急上昇し200℃を越えた時点を加熱限界とし，そのときの熱流束を限界熱流束としている．**Fig. 3 (d)** に示すR113のTYPE1の場合を除き，圧力が高いほど限界熱流束も高くなる傾向がある．これは圧力が高いほど気相の比体積が小さくなり，同一気相体積で運べる熱量が多くなるためと思われる．作動流体が水の場合，単管型では充填率の影響がみられないが，二重管型の場合は充填率が高いほど限界熱流束が高くなっている．これは充填率が高いほど内部再循環が実現されやすく，循環量も多くなり，フラッディングが回避されたためと思われる．作動流体がR113の場合，単管型では充填率による差はほとんど見られないが，二重管型では圧力が低いほど高い値が得られる．これは圧力が低いほど断熱部に存在する液量が増加し，内部再循環が実現されやすくなるためと思われる．

以上の結果より，二重管型において内部再循環が実

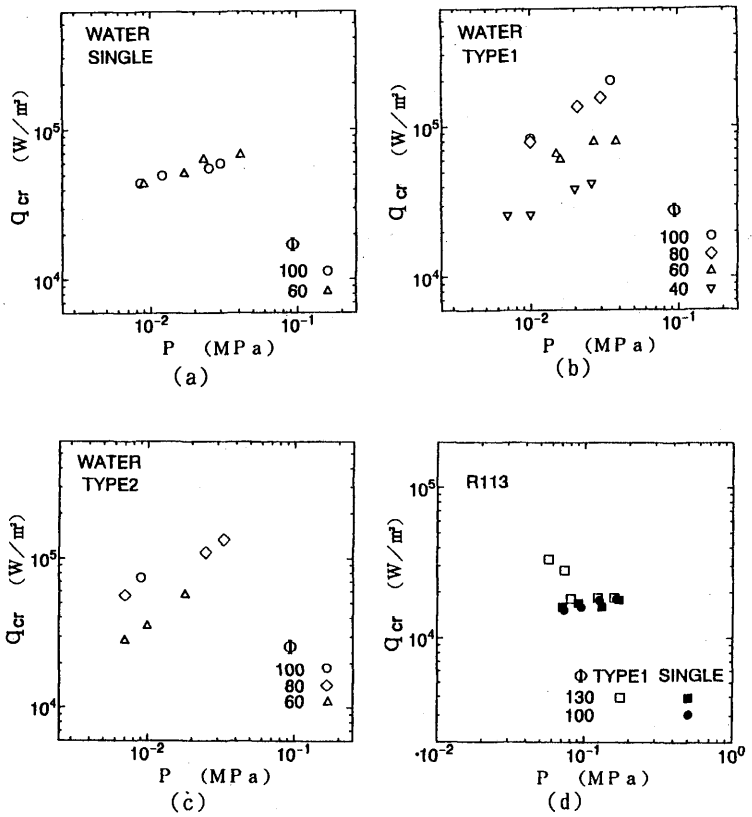

Fig. 3　Critical heat flux vs. system pressure

現され，さらにその循環量が多いほど加熱限界が向上するといえる．

Fig. 4 (a)～(f) にドライアウトに至る温度および圧力の時間変動を示す．ここで図中に示す熱流束は限界時の値である．

作動流体が水の場合，単管型（**Fig. 4 (a)**）では圧力，充填率によらず加熱部中部の壁面温度が急上昇しドライアウトに至る．二重管型（**Fig. 4 (b), (c)**）では，内部再循環の実現が確認されると加熱部最上部で激しい温度振動を繰り返した後ドライアウトに至る．これは加熱部環状流路では気相，液相とも上昇流となっているため，加熱部下端から供給される液が不足したときドライアウトが起こりその位置は最上部となったものと思われる．

一方，作動流体が R113 の場合，単管型（**Fig. 4 (d)**）では圧力，充填率によらず加熱部下部の壁面温度が急上昇しドライアウトに至る．二重管型では（**Fig. 4 (e), (f)**），圧力が低くなるにしたがいドライアウト位置が高くなる．これは圧力が低いほど内部再循環が実現されやすくなり，その流動様式が対向流から上昇流へと変化するためと思われる．

以上より二重管型の場合内部再循環が完全に実現された場合は流動様式が変化し，ドライアウト位置は加熱部最上部付近となることがわかる．

3.　過去のデータの検討

3.1　実験体系

Table 1 に対象とする実験のパラメータと装置主要寸法を示す．case 1[2] は作動流体に R113 を用いた実験であり加熱限界の向上がみられている．case 2 は作動流体に水を用い加熱部長さおよび内管径を変えた実験であるが加熱限界の向上はみられていない．case 3

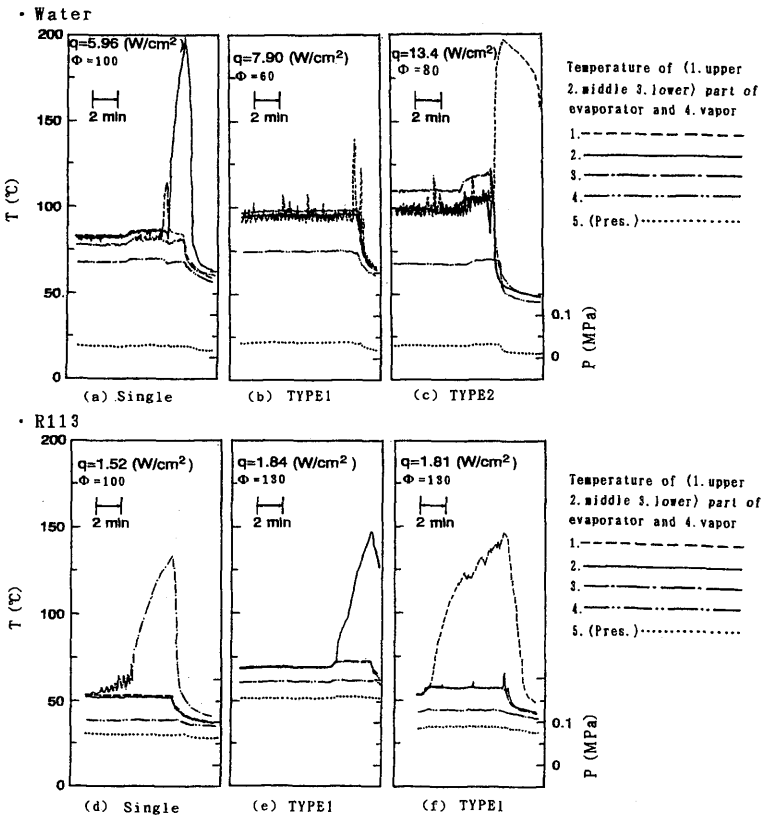

Fig. 4　Fluctuations of temperatures and pressure leading to the dryout

Table 1.　Experimental parameters and main dimensions of the test tube

		case 1	case 2	case 3
• Working fluid		R113	Water	Water
• Fill ratio	(%)	60～95	40～100	40～130
• Temperatur of the cooling water	(℃)	30～70	30～70	30～60
(1) Length of evapoator	(mm)	1510	559	545
(2) Height of inner tube	(mm)	1685	725	680
(3) (2)/(1)	(−)	1.12	1.30	1.25
(4) Cross section for top of the inner tube	(cm^2)	4.52	3.14	2.54
(5) Cross section for outer tube	(cm^2)	18.9	16.9	19.7
(6) (4)/(5)	(%)	24	19	13

は水と R113 の流動様式の比較を目的とした今回の可視化実験である.

3.2　限界熱流束およびドライアウト位置

Fig. 5 に各実験における限界熱流束およびその限界時のドライアウト位置を示す. 図の横軸はいずれも加熱部長さに対する非加熱時の試験部内水位の比であり縦軸はそれぞれ (a) が限界熱流束, (b) が加熱部長さに対するドライアウト位置の比である. さらに単管型の場合の限界熱流束のデータを一次近似した値も記す.

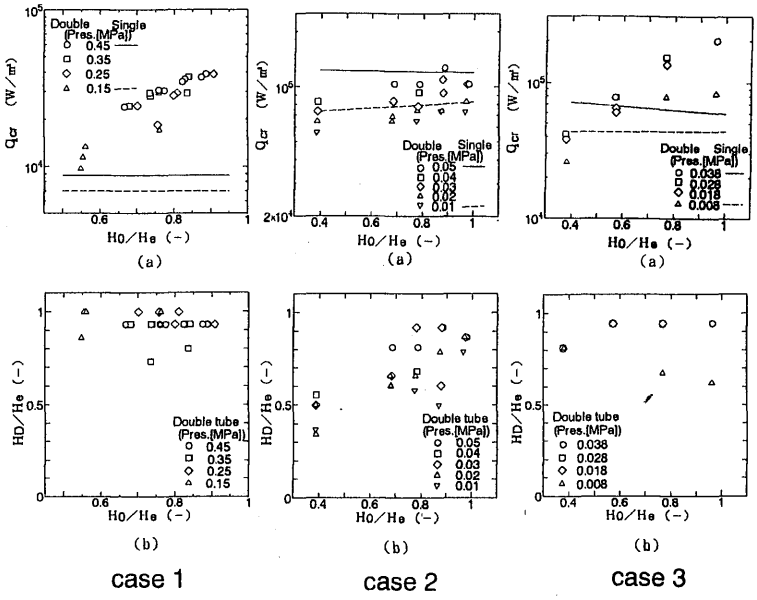

Fig. 5　Critical heat flux and the dryout position

case 1 は作動流体が R113, case 3 は水であるがともに充填率が高いほど限界熱流束も高くなる傾向がある．限界熱流束が単管型に比べ高い場合には，ドライアウト位置はほぼ最上部（0.93以上）であり内部再循環が完全に実現されていると思われる．またドライアウト位置が低くなると限界熱流束も低下する傾向がある．

case 2 は単管型に対して加熱限界の傾向がみられない場合であり，作動流体には水を用いている．充填率の影響は case 1, case 3 ほどはみられず，またドライアウト位置は加熱部中部付近から最上部付近まで広がっており，内部再循環が実現されていない可能性がある．

以上より case 2 で加熱限界の向上がみれなかったのは，実験体系の影響により内部再循環が完全には実現されていなかったためと思われる．したがって以下に重要であると思われる実験体系のパラメータを挙げる．なお，主要なパラメータの詳細は **Table 1** に示す．

(1)　加熱部長さと内管高さの比

内部再循環が実現するには液相が内管上端よりも上部に存在しなければならないことから，この比が1に近いほど良いと思われる．しかし単に漏斗部位置を下げるだけでは流動抵抗が大きくなるため，これよりも断熱部下部のストレート部を短くする方が有効であろう．

(2)　漏斗部上端での断面積比

内管上端でのテーパ部全断面積に対する漏斗部の断面積の比であり，液相の取り込み，漏斗部およびテーパ部の角度に関係する．各 case についてこの値を比較をすると作動流体が水の場合はある程度小さい方が良く，R113 の場合はいずれの case でも加熱限界の向上がみられており，ある程度以上であればこの値にあまり影響されないと思われる．なおこの作動流体による違いは，その流動様式の違いにより，液相の内管内への取り込み方が異なるためである．

4.　結　　言

密閉型熱サイフォンについて，単管型と二種類の二重管型について断熱部より上部を可視化した実験を行い，以下の結論を得た．

1）　単管型，二重管型によらず作動流体が水の場合，テーパ部に明確な液溜まりは存在せず，激しい吹き上げが連続的に起こる．R113 の場合，液溜まりが存在し圧力によりその量が大きく変化する．

2）　二重管型の場合，作動流体によらず内部再循

環が完全に実現され環状流路部が上昇流となると，加熱限界が向上する．

3）二重管型において内部再循環が完全に実現されると加熱部最上部でドライアウトに至る．

4）内部再循環をより完全に行うためには，加熱部長さに対する内管高さの比が1に近いほど良く，また漏斗部上端での内管断面積と全断面積の比および内管漏斗部とテーパ部の角度が重要となる．

参考文献

1) 福田他，第26回日本伝熱シンポジウム講演論文集 E112, 235 (1989).
2) 福田他，日本機械学会講演論文集 Vol. 57, No. 534, 291 (1991).