並流型および向流型プレート式熱交換器における FC-72 流動沸騰に関する研究

小山 幸平*1, 中村 友哉*2, 有馬 博史*1

Investigation on FC-72 Flow Boiling in Parallel- and Counter-flow Plate Heat Exchangers

Kohei KOYAMA^{*1} Yuya NAKAMURA^{*2}, and Hirofumi ARIMA^{*1}

*1 Institute of Ocean Energy, Saga University 1-48 Hirao, Kubara-aza, Yamashiro-cho, Imari, Saga 849-4256

*2 Department of Mechanical Engineering, Saga University 1 Honjo-machi, Saga, 840-8502

This study investigates FC-72 flow boiling in a plate heat exchanger. Bubble behavior and flow pattern in the heat exchanger are directly visualized. The heat exchanger is tested as parallel- and counter-flow configurations to compare hydraulic and thermal performances. Experimental result shows that the region of churn flow in parallel-flow heat exchanger is wider than that on counter-flow one. Overall heat transfer coefficient of the parallel-flow plate heat exchanger is larger than that of counter-flow one due to destruction of thermal boundary layer. The results mean that configuration of plate heat exchanger with flow boiling affects its performances.

Key Words : Heat exchanger, Boiling, Flow pattern, Heat transfer enhancement, Visualization

1. 緒 言

持続可能な社会を構築するため,再生可能エネルギーへの社会的関心が高まっており,その中でも,海洋や温 泉などに存在する小温度差を利用する発電技術が期待されている.小温度差利用発電においては,ポンプ,熱交 換器(蒸発器),タービン,凝縮器を主な構成要素とするシステム内を作動流体が循環し,タービンに連結された 発電機で発電を行う.小温度差発電導入促進のためには,使用する熱交換器を小型化,高効率化し,発電システ ム全体のコストを下げることが需要である.

小温度差発電の蒸発器においては、熱交換効率やメンテナンス性の観点で有利なプレート式熱交換器が用いられる. Hsieh ら⁽¹⁾, Gasparella^(2,3), Táboas ら⁽⁴⁾などは、プレート式熱交換器に対する実験を行い、基本的な伝熱特性の解明や、作動流体質量流束、加熱熱流束などの運転条件が伝熱特性に与える影響について検討している.

プレート式熱交換器は、従来、作動流体と、作動流体を加熱する温水とが対向して流れる向流型や、作動流体 と加熱が互いに直交する直交流型による運転が想定されてきた.これは、沸騰を伴わないプレート式熱交換器に おいて、向流型や直交流型の熱交換効率の方が、作動流体と温水とが同じ方向に流れる並流型よりも優れている という従来の知識に基づくものである.しかし近年、並流型プレート式熱交換器が、他の型式と比較して高効率 であるとする研究結果が Djordjevic ら⁽⁵⁾によって報告された.これは従来の知識とは相反するものである.一方、 Djordjevic ら⁽⁵⁾の実験結果は、プレート式熱交換器の型式によって、その伝熱特性が大きく変化することを示唆し ている.

ここで、プレート式熱交換器の熱流動沸騰特性を理解するためには、熱交換器内部を可視化することが重要と なる.プレート式蒸発器内部の可視化は、 Baba ら⁽⁵⁾、三島ら⁽⁶⁾などによって行われているが、熱交換器内部の 流動沸騰現象が十分に理解されたとは言い難い.

^{*}原稿受付 2014年7月31日

^{*1} 佐賀大学海洋エネルギー研究センター (〒849-4256 佐賀県伊万里市山代町久原字平尾 1-48)

^{*2} 佐賀大学 工学系研究科 機械システム工学専攻 (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1)

E-mail: koyama@ioes.saga-u.ac.jp

本研究では、透明な筐体を持つプレート式熱交換器を用い、蒸発器内部の流動沸騰様相を可視化するとともに、 並流型および向流型プレート式熱交換器の熱流動特性を比較することを目的とする.

2. 実 験

2·1 実験装置

図1に実験装置の概略図を示す.図1(a)は向流型,図1(b)は並流型であり,配管系を組み替えることで熱交換器の型式を変更する.実験装置は,作動流体,温水および冷水の3系統から構成される.作動流体はポンプにより循環させられ,プレヒーターで任意の温度に調節された後,熱交換器に供給される.熱交換器では,熱源である温水により加熱され,作動流体が沸騰する.気液二相流で熱交換器から排出された作動流体は、タンクに戻され、冷水により冷却されることで凝縮し、液単相となる.熱交換器の型式は,作動流体と温水とが対向して流れる向流型と,同じ方向に流れる並流型に分類されが、本研究では、これら両型式に対して実験を行う.作動流体質量流量の測定にはコリオリ式流量計(Keyence, FD-SS2A, ±1%FS.)を,温水体積流量の測定には面積式流量計(Kofloc RK1950AP, ±2%F.S.)を用いる.作動流体および温水の温度測定にはT型熱電対を用いる.

図2に本研究で用いるプレート式熱交換器の概略図を示す.熱交換器は,作動流体側および温水側カバープレート,テフロン製ガスケットおよび伝熱面で構成され,それらがボルトで締め付けられる.カバープレートには,熱交換器内部を可視化するため,透明なアクリルを用いる.作動流体流路は幅150mm×長さ400mm×高さ2mm, 温水流路は幅150mm×長さ400mm×高さ10mmである.伝熱面はチタン製で,図3に示すように,作動流体側の表面には,伝熱促進を目的として,直径300µm,高さ30µmの微細な円柱状のピンフィンが設けられている.



Plate heat exchanger (Test section) 2. Working fluid tank 3. Working fluid pump
Mass flow meter 5. Pre-heater 6. Chiller 7. Hot water tank 8. Heater 9. Hot water pump
Volumetric flow meter

(a) Counter-flow arrangement.

(b) Parallel-flow arrangement.



Fig. 1 Scheatic diagram of experimental setup.

Fig. 2 Dimension of plate heat exchanger.



Fig. 3. Heat transfer surface with pin-fin.

本研究では、熱交換器内部の流動沸騰様相を可視化する.デジタルカメラで流動沸騰様相を撮影し、流動様式の観察およびボイド率の測定を行う.カメラにはNikon D800を、レンズにはAF-S NIKKOR 35mm f/1.4Gを用いる. 撮影時のシャッター速度は1/4000sとした.

2·2 実験方法

本研究では,以下の手順に従って実験を行う.

(1) 作動流体および冷水を循環させる.

(2) 温水タンク内の水を,任意の温度まで徐々に加熱しながら循環させる.同時に,プレヒーターの電圧を, 作動流体が任意の熱交換器入口温度となるように調節する.

(3) 測定データが任意の実験条件で定常状態となった後、データロガーにより測定データを収集する.

(4) デジタルカメラでプレート式熱交換器を撮影し、流動沸騰様相の可視化画像を取得する.

2・3 画像処理およびボイド率

熱交換器内部の流動沸騰様相をデジタルカメラで撮影し、得られた画像に基づき、作動流体の流れ方向に沿っ たボイド率を求める.画像処理およびボイド率の算出は、以下の手順で行う.

(1) 図4に示すように、撮影で得られた画像に対して、気相部分を白色にする画像処理を施す.

(2) パッキン等,作動流体流路以外の要素を削除する.

(3) 画像をグレースケールに変換する.

(4) 作動流体の各流れ方向位置におけるボイド率を算出する.ボイド率は、各位置における画像のピクセル数に基づき、次式により求める.

 $\alpha = N_G / N_T$

ここで、NG は任意の作動流体流路断面における気相のピクセル数、NT はその断面の全ピクセル数である.



Fig. 4. Image processing for two-phase flow.

2.4 熱通過率

プレート式熱交換器を並流型と向流型で運転し、熱通過率を比較する.熱通過率Uは次式により求める. $U = Q / A \Delta T_{lm}$ (2)

ここで、交換熱量Qは次式により求める.なお、添え字wは温水の値であることを示している.

$$Q = \dot{m}_w c_{p,w} \left(T_{w,in} - T_{w,out} \right) \tag{3}$$

また,対数平均温度差ΔT_{lm}は次式で定義される.

$$\Delta T_{lm} = \frac{T_{w,in} - T_{w,out}}{\ln \frac{T_{w,in} - T_{sat}}{T_{w,out} - T_{sat}}}$$
(4)

(1)

2·5 実験条件

並流型および向流型プレート式熱交換器それぞれに対して、等しい条件で実験を行う.実験条件は、作動流体 質量流束 $G = 90 \text{kg/m}^2$ s、平均熱流束 $q = 3 \text{kW/m}^2$ 、蒸発器入口温度 $T = 52 ^{\circ}$ 、飽和圧力 $P_{sat} = 0.1 \text{MPa}$ とする.

3·1 流動様式

3. 結果および考察

図5に、並流型の実験で得られた流動沸騰様相の瞬間写真の例を示 す.ここで、作動流体入口は写真右下に、出口は左上に位置しており、 作動流体は下方から上方に流れている. 伝熱面を挟んだ紙面奥側を熱 源の温水が流れており、並流型では下方から上方に流れている.気液 二相流の流動様式は、図6に示すように、気泡流、スラグ流およびチ ャーン流が観察された. 伝熱面上の作動流体温度が飽和温度に達する と、図 6(a)のように、多数の発泡点において核沸騰が生じ、蒸気気泡 が発生する.発生した球形の蒸気気泡は、浮力流れと液相の作動流体 によって伝熱面上から離され、下流へと運ばれる. 作動流体の流れと ともに、図 6(b)のように気泡は成長、合体し、その形が引き伸ばされ る. このとき、気泡が作動流体流路の深さ方向ほぼすべてを占有する ため、伝熱面上には薄い液膜が存在している.図 6(c)のチャーン流で は、気泡はさらに大きくなるとともに、気泡どうしが複雑に衝突、合 体,分裂を伴いながら流動し,規則性は存在しない.そのため,作動 流体が強く攪拌され、伝熱面上の温度境界層が破壊されることが考え られる.



Fig. 5. Instantaneous picture of FC-72 flow boiling in the parallel-flow plate heat exchanger.



(a) Bubbly flow.



(b) Slug flow. Fig. 6. Observed two-phase flow pattern.



(c) Churn flow.

図7に、向流型および並流型における流動沸騰の瞬間写真を示す.作動流体入口は流路右下に、出口は左上に 位置し、下方から上方へ流れる.作動流体を加熱する温水の流路は、伝熱面を挟んだ紙面奥側にあり、温水は、 向流型では作動流体と対向して上方から下方に、並流型では作動流体と同様に下方から上方へ供給される.

図 7(a)の向流型において、熱交換器に液単相で入った作動流体は、温水から受ける熱で加熱され、核沸騰を開始する。向流型では、温水は写真の上方から下方に供給されるため、伝熱面表面の温度は作動流体出口付近が最も高く、作動流体入口付近が最も低い。そのため、核沸騰開始に至るまでの滞留時間が長く、発泡点が作動流体下流側に多く存在するものと考えられる。発生した蒸気気泡は、互いに干渉しながら成長、合体し、流路内の作動流体を激しく撹拌している。また、左右のガスケットからも気泡が発生し、作動流体流路下流の沸騰様相に影響を与えている。これは、ガスケットを加工した際にできた微細な表面構造が発泡点となったことによるものと考えられ、ガスケットを用いるプレート式熱交換器特有の現象といえる。気液二相流の流動様式は、作動流体の流れに沿って、気泡流、スラグ流、チャーン流に分類される。

図 7(b)の並流型では、作動流体上流側に発泡点が多数存在している.これは、並流型の場合、作動流体を加熱 する温水は、図の下方から上方に供給されるため、作動流体入口付近の伝熱面温度が十分に高く、短い滞留時間 で核沸騰を開始したことによると考えられる.並流型の発泡点が上流側に位置するため、成長、合体など気泡の 挙動の影響が及ぶ範囲が広く、作動流体撹拌の効果が強いことがわかる.並流型においても、向流型と同様、気 液二相流の流動様式は、気泡流、スラグ流およびチャーン流に分類されるが、向流型と比べて気泡流の領域が狭 く、チャーン流の領域が広い.これは、発泡点が作動流体上流側に多数存在することによるためと考えられる.

3・2 ボイド率

図8に、図7で示した画像から求めた並流型および向流型の作動流体流れ方向に沿ったボイド率を示す.なお、 グラフの横軸は、作動流体入口部分を基準高さ(z=0 mm)とし、作動流体の流れ方向に沿った距離である.い ずれにおいても、核沸騰の開始に伴い蒸気気泡が発生し、ボイド率が上昇している.作動流体の流れとともに気 泡が成長、合体し、気泡サイズが大きくなることで、ボイド率が急激に増加している.並流型では、図7に示す ように、発泡点が向流型よりも作動流体上流側に存在するため、上流側におけるボイド率が大きくなっている. そのため、この領域では、気泡によって流れが攪拌され、伝熱面上の温度境界層が破壊されていることが推察で き、熱交換器の型式によって伝熱特性に差異が生じることが考えられる.



(a) Counter-flow arrangement.

(b) Parallel-flow arrangement.

Fig. 7. Classifications of flow pattern.



Fig. 8. Void fraction along direction of FC-72 fluid flow.

3·3 熱通過率

図9に、本実験条件における並流型と向流型の熱通過 率を示す.熱通過率は、向流型に比べて並流型の方が約 6%大きく、この傾向は Djordjevic ら⁽⁵⁾の結果と対応して いる.並流型では向流型に比べてチャーン流の領域が広 く、核沸騰開始点が作動流体上流側に位置している.そ のため、気泡によって作動流体の流れが強く撹拌され、 温度境界層が破壊されたことに起因すると考えられる. 以上の結果は、作動流体と温水の供給方向によってプレ ート式熱交換器の熱流動特性が変化することを意味して いる.



4. 結 論

作動流体に FC-72 を用いた並流型および向流型プレート式熱交換器において,流動沸騰様相の可視化および熱 通過率の測定を行った.本実験条件においては,並流型の方が向流型よりもチャーン流の領域が広くなること, これに伴う作動流体の撹拌効果により,伝熱面上において温度境界層が破壊され,並流型の方が向流型よりも熱 通過率が大きくなることを明らかにした.また,本研究の結果は,熱交換器の型式によって伝熱特性が大きく影 響を受けることを示唆している.

文 献

- (1) Hsieh, Y.Y. and Lin, T.F., "Saturated flow boiling heat transfer and pressure drop of refrigerant R-410A in a vertical plate heat exchanger", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45 (2002), pp. 1033-1044.
- (2) Longo, G.A. and Gasparella, A., "HFC-410A vaporisation inside a commercial brazed plate heat exchanger", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32 (2007), pp. 107-116.
- (3) Longo, G.A. and Gasparella, A., "Refrigerant R134a vaporisation heat transfer and pressure drop inside a small brazed plate heat exchanger", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 30 (2007), pp. 821-830.
- (4) Táboas, F., Vallès, M., Bourouis, M., and Coronas, A., 2010, "Flow boiling heat transfer of ammonia/water mixture in a plate heat exchanger", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 33 (2010), pp. 695-705.
- (5) Djordjevic E. and Kabelac, S., "Flow boiling of R134a and ammonia in a plate heat exchanger", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51 (2008), pp. 6235-6242.
- (6) Baba, T., Harada, S., Asano, H., Sugimoto, K., Takenaka, N. and Mochiki, K., "Nondestructive inspection for boiling flow in plate heat exchanger by neutron radiography", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Vol.605, No, 1-2 (2009), pp.142-145.
- (7) 三島文也,有馬博史,小山幸平,岡本明夫,池上康之,アンモニア強制対流のプレート式蒸発器における沸騰様相, 佐賀大学海洋エネルギー研究センター報告 OTEC, Vol.16, (2011), pp. 19-32.