

透明樹脂プレート式熱交換器内部の可視化と画像処理を用いた ボイド率測定方法の検討

中山 雅士^{*1}, 安永 健^{*2}, 森崎 敬史^{*2}, 佐々木 究^{*1}, 大津 康德^{*1}, 池上 康之^{*1}

Flow Visualization And Void Fraction Measurement via Image Processing Using Transparent Resin Evaporator

Masashi NAKAYAMA^{*1}, Takeshi YASUNAGA^{*2}, Takafumi MORISAKI^{*2},
Yasunori OHTSU^{*1} and Yasuyuki IKEGAMI^{*2}

^{*1,2} Graduate school of Science and Engineering, Saga University, 1-Honjo-machi, Saga-shi, Saga 840-8502^{*1}

^{*2} Institute of Ocean Energy, Saga University, 1 Honjo-machi, Saga-shi, Saga 840-8502

Abstract

Plate heat exchangers are used as evaporators and condensers for applying power generation in small low-grade thermal energies which uses less than a temperature of 150 °C as a heat source because of its compactness and high-performance. However, flow patterns of two-phase flow accompanying with the evaporation in the narrow channel of plate heat exchangers have not revealed yet. In this research, the transparent resin made plates are used to visualize and observe the two-phase flow in the herringbone plate evaporators. The experimental movies have analyzed by the image processing to calculate the mean void fraction in five times five areas. The image processing was manipulated by the original codes constructed by Python and OpenCV. The results shows the effective numbers of frames to denote the mean void fraction in the unsteady flow and the effect of the edge line width parameters on the mean void fraction.

Key words : Visualization, Evaporator, PHE, Low-grade thermal energy conversion, Image processing

1. 緒 言

海水や温泉水, 工場排熱などの比較的低い未利用の熱源の温度差を利用して発電する低熱源温度差発電は, 高い伝熱性能かつコンパクトであるプレート式熱交換器が適用されている. プレート式熱交換器は, 一般的に伝熱性能が高いが, 圧力損失も大きい. 圧力損失が大きい場合, 流体を流すポンプ動力が大きくなり, 所内動力が大きくなる. したがって, 高い伝熱性能と低い圧力損失を考慮したプレート式熱交換器の伝熱面形状を開発する必要がある. 特に作動流体が蒸発・凝縮などの相変化を伴うプレート式熱交換器の性能向上には, 熱交換器内部の流動状態を把握することが極めて重要である. 蒸発現象や凝縮現象を伴う気液二相流は複雑であり, 内部の流動状態が熱交換器内の伝熱性能に大きな影響を与えるが, 熱交換器内部の流動状態は十分に解明されていない. そのため, 熱交換器内部の可視化を行うことは流動状態を明らかにするための有効な方法であり, これまでにも様々な方法を用いて可視化の研究が行われている. 代表的なプレート式熱交換器の可視化に関する研究は, 流動様式のみを観察したタフト法や染料を用いた液単相の可視化や中性子ラジオグラフィーを用いた空気-水の二相流およびフロン系冷媒の沸騰現象の可視化などがある(Takenaka, et al., 1996, Asano, et al., 2005, 2004, Baba, et al., 2009). 一方, 熱交換を伴う可視化に関する研究は, 金属製のプレートとアクリルなどの透明なプレートを用いて製作した熱交換器を用いた可視化が行われている(Vlasogiannis, et al., 2002, Nilpueng, et al., 2010, 2014, Kho and Mullersteinhagen, 1990, Nilpueng, 2014, Solotych, et al., 2016, Arima, et al., 2010). Lee (2020) は, 金属プレート面での低

原稿受付 2021 年 10 月 13 日

^{*1} 佐賀大学大学院理工学研究科 (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町 1)

^{*2} 佐賀大学海洋エネルギー研究センター (〒849-8502 佐賀県佐賀市本庄町 1)

E-mail of corresponding author: yasunaga@ioes.saga-u.ac.jp

GWP 媒体である R1234ze(E)の蒸発現象について、アクリルによる抑え板で可視化および内部の温度計測を行い、沸騰の様相、気泡の流動について明らかにしている。

プレート式熱交換器の場合、新規伝熱面形状の熱交換器について試験を行う際、試験プレートの金型製作費が高く、様々な伝熱面形状の試験を行うことは高コストであった。しかし、3D プリンタによって簡単に安価に透過率の高いプレート式熱交換器を製作できるようになり、Nakamura et al. (2016) は、透明なヘリンボーンタイプのプレート式熱交換器を 3D プリンタにより製作し、蒸発および凝縮の状態の可視化を行っており、シェブロン角および入口オリティー、作動流体の質量流束を変化させ、伝熱面形状の違いによる内部の流動現象を可視化している。しかし、従来の研究では、熱交換器内部の気液界面の流動現象を目視で確認して定性的に評価したのみで定量的な評価が行われていない。

そこで、本研究ではヘリンボーンタイプの透明樹脂のプレート式熱交換器内で蒸発を伴う二相流の可視化を行い、画像処理によってボイド率を推算する。即ち、高速度カメラを用いて記録した動画からボイド率の測定について、画像処理の蒸発初期の平均ボイド率を定性的に評価する手法の構築および測定結果について報告する。

2. 実験装置および実験方法

熱交換器内部の可視化のために 3D プリンタを用いて、透明樹脂 (TSR-828, TSR-884B) でプレート式熱交換器を製作し、熱交換器内部の蒸発過程を SONY 製の高速度カメラ (型式: RX10III) で、960fps で撮影した。図 1 に可視化実験装置のフロー線図を示す。熱交換器入口の作動流体のクオリティーを調整するためのプレヒーター、凝縮器、補助凝縮器は、ステンレス製の熱交換器を用いた。図 2 に可視化用試供体である透明樹脂性熱交換器プレート (以下、透明プレート)、および表 1 に熱交換器プレートの仕様を示す。プレートは厚さ 1.5mm のヘリンボーンタイプでシェブロン角 2β がそれぞれ 60° , 90° , 130° の 3 種を用いた。図 3 に透明プレートの構成を示す。プレート内部は 3 つの流路から構成され、中央を作動流体、両端を熱源が対向流で流れる。光源を熱交換器プレートの上下側面に設置し、真横から撮影するようカメラを設置する。作動流体は HFE7000 (沸点: 34.2°C) を使用し、熱源は温水で入口温度は 40°C 一定とした。作動流体質量流束 G_{wf} は $G_{wf}=17.3, 26.0, 34.7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ とした。熱交換器入口の状態は過冷液とし、プレヒーターを用いて過冷度を調整し実験を行った。HFE7000 の熱物性は REFPROP Ver10.0 (Lemmon, 2018)を用いて算出した。

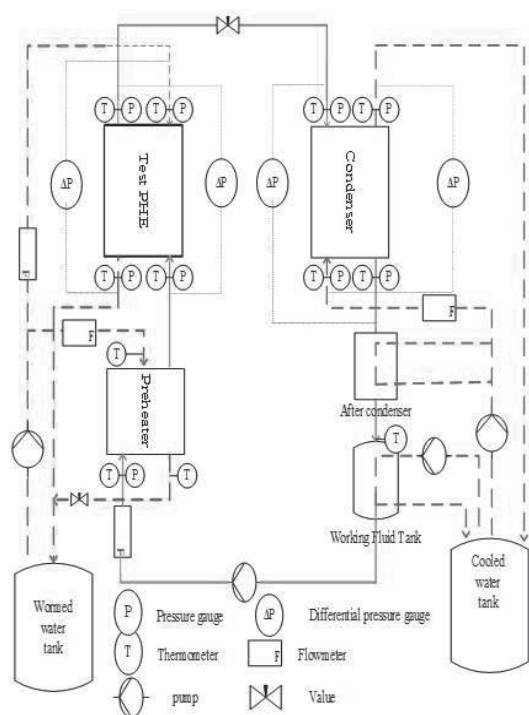


Fig.1 Flow diagram of the experimental equipment.

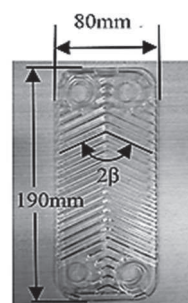


Fig.2 Transparent PHE.

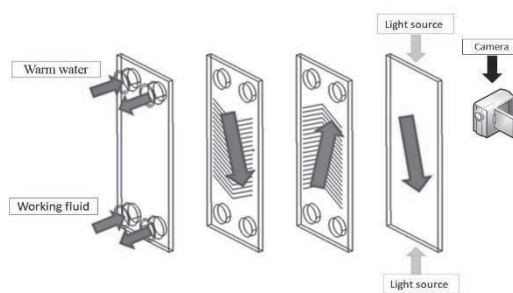


Fig.3 Configuration of PHE.

Table 1 Specifications of a transparent PHE made by a 3D printer.

Chevron angle: 2β (deg)	60	90	130
Gap between plates (mm)	2	2	2
Cross section area (m ²)	0.0304	0.0318	0.0304
Plate length (mm)	190	192	190
Plate width (mm)	80	83	80
Plate thickness (mm)	1.5	1.5	1.5
Material	TSR-828	TSR-828	TSR-884B

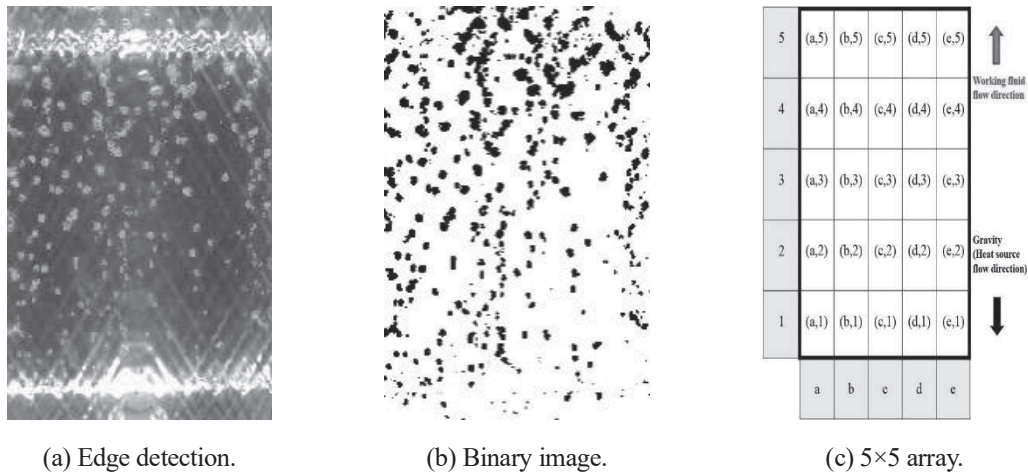


Fig.4 Image processing process.

3. 画像処理によるボイド率測定方法

PHE 内部の流動状態を理解するために画像処理技術によって、記録された可視化実験で得られた画像からボイド率を算出した。本研究では、Python と OpenCV によるオリジナルの画像処理コードを作成した。ボイド率の算出のための画像処理過程を図 4 に示す。画像処理では、(1)可視化の動画から各フレーム間の背景差分を算出し、上昇する気泡のエッジ検出を行い、1 フレームごとに画像を分ける図 4(a)), (2)画像からエッジのみを抽出した画像を作成する, (3)エッジ外部 (気泡以外の背景部分) を塗りつぶす, (4)エッジ外部を抽出することで気泡を黒色部分, 他を白色部分で表した二値画像とし, 黒色部分を気泡と仮定し, その面積比をボイド率 α とする(図 4(b)). この操作を各フレーム毎に繰り返し, 最大 2054 枚のフレームの平均値を平均ボイド率とした。

平均ボイド率 α_m はプレート伝熱面の投影面積に対する気泡の面積が占める割合として仮定して計算した。

$$\alpha_m = \frac{A_{ab}}{A} \quad (1)$$

ここで A_{ab} は画像処理により気泡と判断される黒色部分の面積(m²), A はボイド率を計算する範囲のプレート伝熱の投影面積(m²)を示す。本研究では画像を図 4(c)のように 5 行(Columns), 5 列(Row)に分割し, 各箇所における平均ボイド率の値を計算した。なお, 実際の流れは 3 次元であるが, 奥行き方向の影響は無視した。

4. 結果と考察

4・1 フレーム枚数の影響

蒸発現象は非定常であるため, 平均ボイド率 α_m の測定には複数枚の画像フレームから平均値を算出する必要が有る。図 5 に画像処理に用いたフレーム数を 5, 500, 1000, 2054 と変えた場合の α_m をそれぞれ示す。図

5 から, フレーム数が 500 以下では 3 列や 4 列においてボイド率の低下や各行における大きなばらつきが示されているが, フレーム数 1000 を超えると, 各行の値の差異は作動流体の出入口付近のみが大きく, 各行の α_m が入口から出口に向かって増加する傾向を捉えている. そのため, 本研究では, 以降のデータは, フレーム数 2054 枚を用いる.

4・2 エッジ抽出線幅の影響

3 章の画像処理手順において, エッジを検出する際, OpenCV プログラムによってその線幅を変えることが可能である. 線幅が細過ぎると気泡の気液界面の境界線が閉じず, 気泡の面積を捉えることが難しい. 一方, 線幅を太くし過ぎると過大に気泡の面積を捉えることが懸念される. 本節では, エッジ検出の際の線幅を境界面の外側 (線幅 2) と内側 (線幅-5) に挿入した場合の α_m の違いについて示す. 図 6(a), (b) に 3 種類のプレートにおける列 1~5 の平均 α_m の変化を示す. 図 6 中の 60, 90, 130 は 2β を, 括弧内は作動流体の平均質量流束 G_w , (a) は線幅 2, (b) は線幅-5 を示す.

図 6 から, 線幅 2 の場合は出口付近の α_m は 12~22% に達しているのに対し, 線幅-5 の場合は 7~12% 程度と 5~10% の差異がある. この差異は気泡が比較的少ない入口付近の 1 列目では 3% 程度以内と小さいが 2 列目以降では顕著に差異が大きくなっている. これは, 気泡の形状が単純な球形ではなく, 複雑な形状になり, 合体や分離を伴い, 気泡が密になると近傍の気泡の影響が生じ, それらの影響から気液界面の境界に十分な輝度が得られていないことが要因と推測される. すなわち, 気泡の気液界面での輝度が小さい場合は, 内側にエッジの線を示した場合, 閉じた気泡の形状にできず, 線になっている可能性がある. さらに, 図 6 より, 2β が 130° では, 作動流体の出口付近では α_m が低下している. これは, 気泡が大きく成長し, 気泡流からスラグ流になり, 本研究で利用したプログラムでは気液界面の検出が困難になっているためと推測される. なお, この出口付近の領域は目視でも気液界面は確認できるものの, 気液の両相の領域を特定するのは難しい. 今後, α_m が 20% を超える領域でも両相の領域を特定できる実験方法やプログラムの開発が必要である.

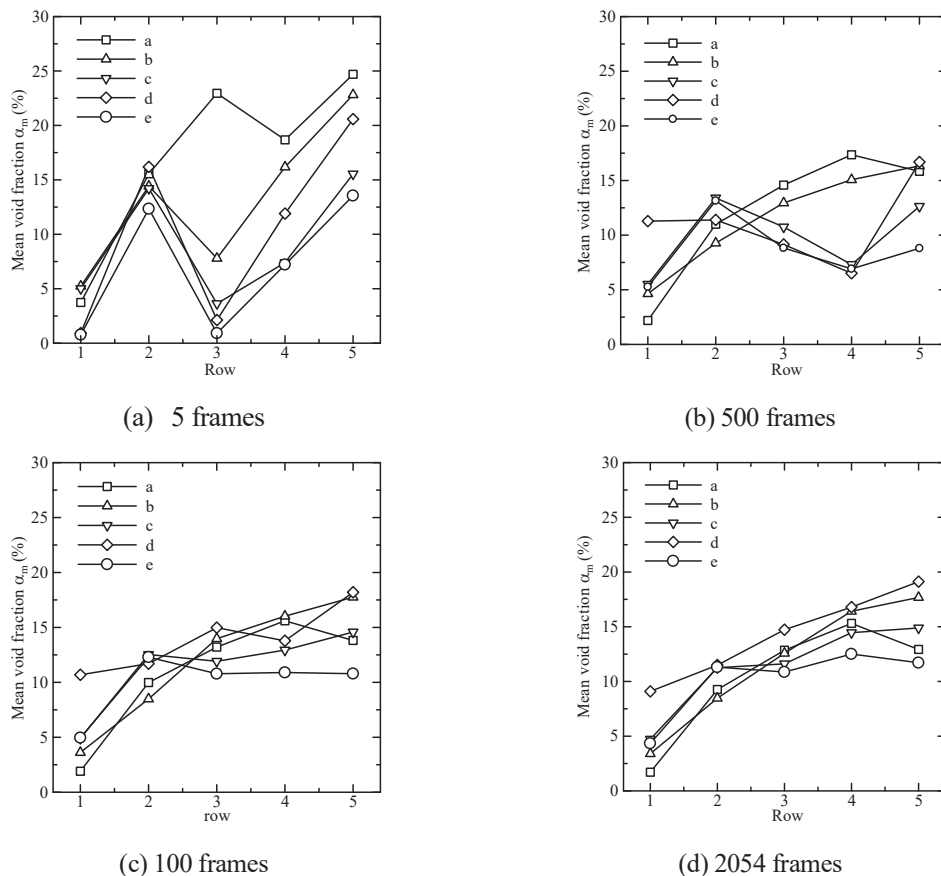


Fig. 5 Effect of processed frame number on void fraction ($2\beta=60^\circ$).

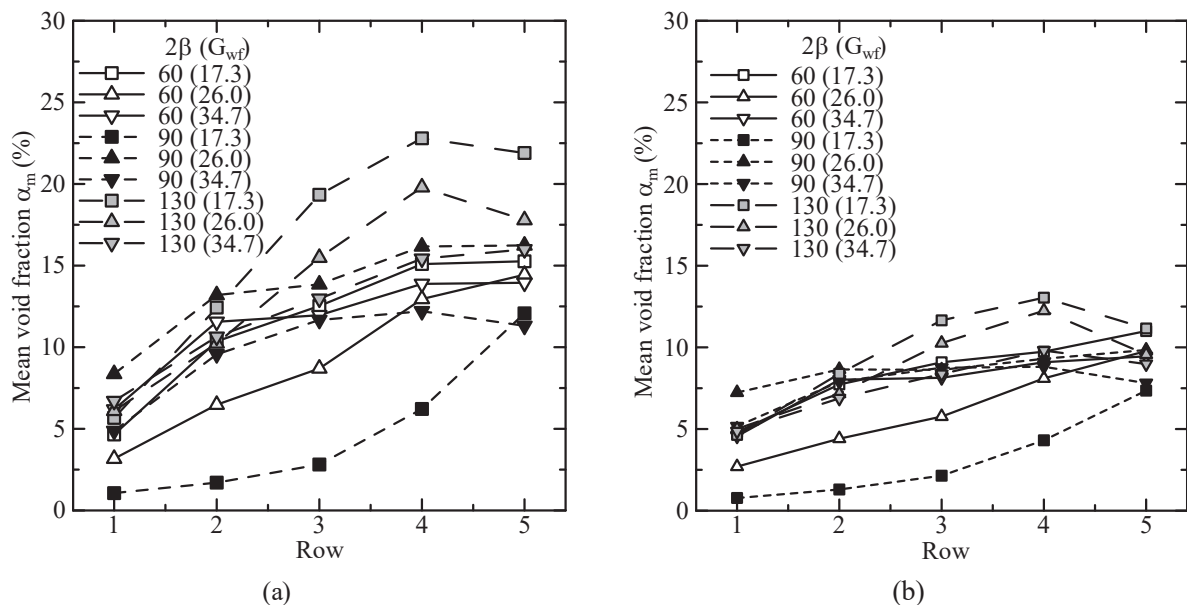


Fig. 6 The mean void fraction variation in three chevron angle plates using different edge line width parameters; (a) edge line width parameter is 2; (b) edge line width parameter is -5.

4・3 シェブロン角の影響

図 6 から、 2β が 130° の場合が他の角度に比べて出口での α_m が大きく、また 3 種類のシェブロン角から、 G_{wf} が小さい程、プレート出口での α_m が大きくなる傾向がある。 2β が小さいほど、ヘリンボーンの溝に沿って流れる傾向があり、 2β が大きいほど、入口付近で作動流体が流れの垂直方向に広がった後、鉛直方向に流れる傾向がある。したがって、 2β が大きいほどプレート全体に広がり、伝熱面を有効に利用できるため、プレート出口での α_m が大きい傾向となる。 G_{wf} が小さいほど α_m が大きくなる傾向は、流量が小さいほどヘリンボーン溝に沿って流れるため、流れの垂直方向に気泡が広がり、よりプレート全面に均一に流れているためである。

5. 結 言

透明樹脂を用いた可視化用蒸発器を用い、相変化を伴うプレート内部流動現象を観察するために、画像処理プログラム構築のため、画像フレーム数、気液界面の抽出線幅の影響が平均ボイド率の変化を確認した。また、平均ボイド率が入口から出口に向かって増加する変化を定量的に示した。今後、ボイド率が 20% を超える領域でボイド率を正確測定する実験やプログラムの構築が必要である。

謝 辞

本研究は国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST, JPMJSA1803) と独立行政法人 国際協力機構 (JICA) の連帯事業である地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS) および公益財団法人 JKA の競輪&オートレースの補助事業の支援を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

文 献

- Akbar, M. K., Plummer, D. A., Ghiaasiaan, S. M., On gas-liquid two-phase flow regimes in microchannels, International Journal of Multiphase Flow, Vol.29 (2003), pp.855-865.
 Arima, H., Kim, J.H., Okamoto, A., Ikegami, Y., Local boiling heat transfer characteristics of ammonia in a vertical plate evaporator, International Journal of Refrigeration, Vol.33 (2010), No.2, pp.359-370.

- Asano, H., Takenaka, N., Wakabayashi, T., Fujii, T., Visualization and void fraction distribution of downward gas-liquid two-phase flow in a plate heat exchanger by neutron radiography, *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A*, Vol.542 (2005), pp.154-160.
- Asano, H., Takenaka, N., Fujii, T., Maeda, N., Visualization and void fraction measurement of gas-liquid two-phase flow in plate heat exchanger, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol.61 (2004), pp.707-713.
- Baba, T., Harada, S., Asano, H., Sugimoto, K., Takenaka, N., Nondestructive inspection for boiling flow in plate heat exchanger by neutron radiography, *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A*, Vol.605 (2009), pp.142-145.
- 池上康之, 川畑佑介, Sami Mutair, 浦塚慎也, 3D プリンタを用いたプレート式熱交換器の性能試験に関する研究, 第 51 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2014), I224(3).
- 池上康之, 安永健, 森崎敬史, 佐々木究, 低熱源温度差発電に用いるプレート式熱交換器における蒸発現象の可視化, 第 23 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集 (2018), E123.
- Lee, D., Jo, C., Kim, B., Kim, Y., "Boiling flow patterns and dry-out characteristics of R-1234ze(E) in a plate heat exchanger, *Int. Heat Mass. Transfer*, Vol.161 (2020), p.120308.
- Lemmon, E. W., Bell, I. H., Huber, M. L., McLinden, M. O., "NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties – REFPROP, Version10.0" (2018), NIST.
- Kho, T., Muller-stinhagen, H., An experimental and numerical investigation of heat transfer fouling and fluid flow in flat plate heat exchangers, *Trans. Int. Chem. Eng.*, Vol.77 (1990), pp.124-130.
- Nilpueng, K., Wongwises, S., Two-phase gas-liquid flow characteristics inside a plate heat exchanger, *Experimental Thermal and Fluid science*, Vol.34 (2010), pp.1217-1229.
- Nakamura, M., Kawabata, Y., Yasunaga, T., Ikegami, Y., The visualization of phase change phenomena in herringbone type plate heat exchanger using 3D-printer, *The 27th International Symposium of Transfer Phenomena* 20-23 September (2016), No.206.
- Niedbalski, N., Johnson, D., Patnaik, S. S., Banerjee, D., Study of a multi-phase hybrid exchanger- reactor (HEX reactor) : Part 1 -Experimental characterization, *International Journal of Heat and Mass transfer*, Vol.70 (2014), pp.1078-1085.
- Solotych, V., Lee, D., Kim, J., Amalfi, R. L., Thome, J. R., Boiling heat transfer and two-phase pressure drops within compact plate heat exchangers: Experimental and flow visualization, *International Journal of Heat and Mass transfer*, Vol.94 (2016), pp.239-253.
- Takenaka, N., Asano, H., Fujii, T., Ushiro, T., Iwatani, J., Murata, Y., Mochiki, K., Taguchi, A., Matsubayashi, M., Tsuruno, A., Application of neutron radiography to visualization of cryogenic fluid boiling two-phase flows, *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A*, Vol.337 (1996), pp.174-176.
- Vlasogiannis, P., Karagiannis, G., Argyropoulos, P., Bontozogloy, V., Air-water two-phase flow and heat transfer in a plate heat exchanger, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.28 (2002), pp.757-772.
- Xu, Y., Fang, X., Correlations of void fraction for two-phase refrigerant flow in pipes, *Applied Thermal Engineering*, Vol.64 (2014), pp.242-251.