

プレート式蒸発器表面の単一キャビティーからのFC-72の核沸騰気泡挙動 (低質量流束条件の場合)

有馬博史^{*1}, 秋山龍太^{*2}

Bubble behavior of FC-72 nucleate boiling from single cavity on the plate evaporator heat transfer surface (At the low mass flux condition)

Hirofumi ARIMA^{*1}, Ryuta AKIYAMA^{*2}

^{*1} Institute of Ocean Energy, Saga University
1-48, Hirao, Kubara-aza, Yamashiro-cho, Imari-shi, Saga, 849-4256, Japan

^{*2} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science and Engineering, Saga University
1-Honjo, Saga-shi, Saga, 840-8502, Japan

Abstract

Reduction of heat exchanger cost is a key factor in the economic viability of ocean thermal energy conversion (OTEC) systems. The OTEC system has a plate evaporator and a condenser, and these heat exchangers affect heat transfer using ammonia and seawater. The evaporator produces ammonia vapor, which is then sent to the steam turbine. Considering that an improvement in the boiling heat transfer coefficient leads to an enhancement in the heat transfer efficiency of the evaporator, the elucidation of boiling phenomena in the evaporator is necessary.

In this study, a visualization experiment on the boiling phenomenon of ammonia was performed. An artificial cavity was created in the plate evaporator to observe the growth of nucleation bubbles using the heat transfer surface to check the process just after nucleation among the forced convection nuclear boiling. The cavity was employed to remove the influence of bubbles from multiple nucleation sites. The experiment was performed using FC-72 as the working fluid at low mass flux $G = 10 - 50$ kg/m²s and heat transfer coefficient $q = 30 - 60$ W/m². The impacts on bubble growth rate and velocity were investigated in the experiment. The visualization was captured using a high-speed video camera with a macro lens and a digital still camera. The results were derived from image analysis after the experiments.

As the increase in the velocity of bubbles did not depend on mainstream fluid velocity, the observation of bubble growth was completed before their removal from the nucleation site. Moreover, the observation of bubble growth was not carried out in the superheated liquid layer.

Key words : Visualization, Nucleate boiling, FC-72, Bubble growth, Evaporator

1. 緒 言

海洋温度差発電用のプレート式蒸発器の性能向上のため、熱交換器の沸騰熱伝達特性の解明が急務である。熱伝達特性の解明には、沸騰熱伝達の測定および沸騰様相の観察による熱交換器内での局所的な沸騰現象の解析が必要である。沸騰熱伝達については、アンモニアを媒体とした研究が著者ら (Arima, 2010) によって行われており、プレート式熱交換器内の局所熱伝達について操作圧力および作動流体流量、熱流束による影響について明らかにされている。しかし、プレート式熱交換器の可視化による沸騰様相は、熱交換器の構造上、非常に難しく、特にアンモニアを媒体とした観察は、著者ら (Arima, 2011) および Okamoto ら (Okamoto, 2011) による局所の観

原稿受付 2019年7月30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 佐賀大学理工学部機械システム工学科 (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町 1 番)

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

察のみであり、プレート全体については未だに行われていない。一方、小山ら (小山, 2014, 2015) および著者ら (有馬, 2016) はプレート式熱交換器を想定して、1枚のステンレスプレートで構成された熱交換器を用いて、FC-72の沸騰様相の可視化による観察を行い、沸騰様相の分布について詳細な解析を行っている。これらの研究ではプレート全体に複数の発泡点が形成され、同時に複数の気泡が発生し、かつ、流動の中で合体、分裂を繰り返すため、個々の核沸騰気泡の観察は非常に困難であった。そのため、個々の気泡の挙動の観察には一つの発泡点からの気泡の挙動について観察が必要と考えた。

そこで本研究では、核沸騰気泡の強制対流下における挙動を観察するために、伝熱面に1個の人工キャビティを設けた装置を用いてFC-72を作動流体とした可視化実験を行った。人工キャビティを用いた沸騰現象の可視化についての研究としてThorncroftら (Thorncroft, 1998) の矩形流路におけるFC-87の強制対流沸騰、Okawaら (Okawa, 2005) による円管における水の強制対流沸騰、Leeら (Lee, 2011) のマイクロチャンネルにおける水の強制対流沸騰条件における核沸騰気泡の挙動が観察されているが、本研究ではプレート式熱交換器を想定した狭隘流路内での強制対流沸騰に注目した観察を行い、気泡の成長速度および移動速度についての測定した。また、本研究の先行研究として、著者らはこれまで $G > 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ の高質量流束における測定 (有馬, 2017, Arima, 2018), $q < 20 \text{ W/m}^2$ の低熱流束における測定 (有馬, 2018)を行っているが、本報では新たに $G < 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ の低質量流束条件の測定結果の報告を行う。

2. 記号

$A, B,$:	定数	z	:	蒸発器幅方向座標	[m]
C, D	:			:	ギリシャ文字	
c_p	:	定圧比熱	α	:	温度伝導率	[m ² /s]
d	:	気泡寸法	θ	:	接触角	[°]
g	:	重力加速度	ρ	:	密度	[kg/m ³]
G	:	質量流束	σ	:	表面張力	[N/m]
h	:	熱伝達率	添字			
h_{fg}	:	蒸発潜熱	in	:	入口	
Ja	:	ヤコブ数	l	:	液相	
k	:	熱伝導率	loc	:	局所	
l	:	熱電対間隔	out	:	出口	
n	:	指数	sat	:	飽和	
P	:	圧力	v	:	気相	
q	:	熱流束	$wall$:	壁面	
T	:	温度	x, y, z	:	蒸発器上座標	
v	:	気泡速度				
x	:	蒸発器流れ方向座標				
y	:	蒸発器間隔方向座標				

3. 実験

3-1 実験装置

図1に実験装置の概略図を示す。実験装置は、作動流体系であるテストセクション (可視化装置)、プレヒーター、作動流体タンク、作動流体ポンプと温水循環系である温水タンク、温水ポンプで構成されている。作動流体はFC-72を用いた。実験では、作動流体を作動流体タンクから作動流体ポンプによって循環させて、プレヒーターで一旦予熱した後に、テストセクションで沸騰させる。沸騰後の作動流体はタンクに戻される。

実験装置では、以下の装置および測定用機器を用いた。作動流体ポンプは遠心ポンプ (スペック製, Y-2951W-MK.0058) を用いた。プレヒーターは300Wのリボンヒーターを巻き付けた外径12.7mm、長さ1200mmの銅管で

ある。リボンヒーターは、1kW のボルトスライダ (東京理工舎製: RSA-10) を用いて加熱を行った。温水タンクの加熱には 3kW の投げ込みヒーター (八光電機製: BWA3230) を用い、温調器 (オムロン製, E5CB-Q1TC) によって任意の温度に調整した。また、温水ポンプには遠心ポンプ (エレポン化工機製: SL-75N) を用いた。系内の温度の測定には熱電対 (林電工製: K 型シース熱電対, 精度 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$), 作動流体の圧力測定には圧力変換器 (横河電機製: FP101A-B31, 精度 $\pm 0.25\%$ of F.S.), 作動流体の質量流量測定には質量流量計 (キーエンス製: FD-SS2A, $\pm 1\%$ of F.S.), 温水流量の測定には、体積流量体積流量計 (キーエンス製: FD-M50AT, $\pm 1.6\%$ of F.S.) を用いた。また、これらの測定値はデータロガー (グラフテック製: GL820) に収録した。

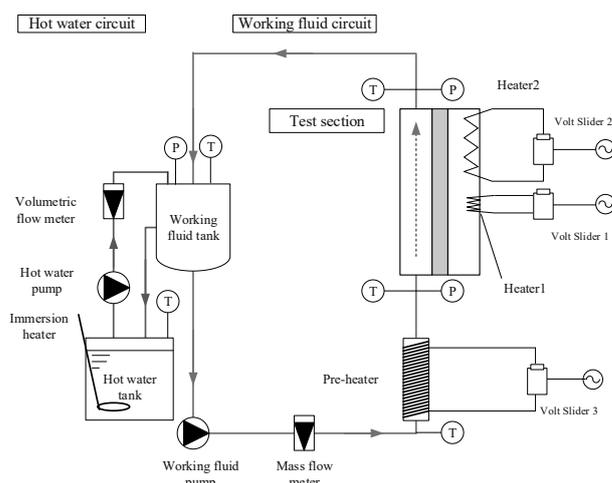


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

3・2 テストセクション

図 2 にテストセクションの概略図を示す。テストセクションは、伝熱部 (テストプレート), スペーサー, カバーで構成される。テストセクション全体の外形は、長さ 620mm, 幅 60mm, 高さ 30mm である。伝熱部は SUS304 製で、中央の長さ 580mm, 幅 20mm, 高さ 19mm のブロックとその周辺に厚さ 5mm のフランジが配された構造となっている。また、周辺のフランジには O リング用の溝が設けられている。スペーサーは厚さ 2mm のテフロン製で、形状は伝熱部のフランジと同一で、フランジに被せて使用する。またスペーサーで伝熱部とカバーとの間に隙間を造ることで、作動流体

体流路の間隔 (2mm) を構成する。カバーはアクリル製で、伝熱部の表面を直接観察ができる。

伝熱部の構造を図 3 に示す。伝熱部には流路入口から 225 mm, 流路幅方向に対して中央の伝熱面表面に人工キャビティーを 1 か所設けた。人工キャビティーは、直径 0.5mm のドリルの先端で空けた深さ約 0.05mm の円錐状の穴である。人工キャビティーの写真を図 4 に示す。また、伝熱面表面は人工キャビティー以外での沸騰気泡の発泡を抑えるため、平均粗さ 25 μm で仕上げた。伝熱部本体には、内部の温度分布の測定のために計 30 本の K 型素線熱電対 (坂口電熱製: K-6F, 線径 0.32mm) を配置した。熱電対は、伝熱部のヒーター加熱面から空けた計 14 本穴 (深さ 15mm, 直径 1mm) と、人工キャビティー直下に設けた 1 本の穴 (深さ 4.5mm, 直径 1mm) に 2 本 1 組で配した。なお、伝熱部の厚さは 19 mm あるが、人工キャビティー直下にヒーター加熱面側から長さ 20mm, 幅 10mm, 深さ 11.6mm の溝を掘ることで厚さを 7.4mm まで薄くした後に、前述の熱電対用の穴を設けた。人工キャビティー直下の熱電対の配置を図 3 の右下の拡大図に示す。

伝熱部のヒーター加熱面側には、ヒーター 1, 2 の二種類のヒーターを配した。ヒーター 1 は人工キャビティー加熱用のセラミックヒーター (100V-100W, 坂口電熱製: MS-1) であり、前述の溝の底部に配置した。また、ヒーター 2 は保温用ラバーヒーター (100V-90W, 坂口電熱製: SAM0330) であり、人工キャビティーより下流側に配した。出力の調整はボルトスライダ 1 および 2 によって行った。

3・3 可視化装置

テストセクションの可視化には、静止画の撮影にデジタルスチルカメラ (ニコン製: D800, 画素数 36.3Mpixel), 動画の撮影に高速度ビデオカメラ (DITECT 製: HAS-U2, 1000fps@640x480 pixel), また光源としてコールドランプ (NAC 製: UF3252NAC, 250W) とクリップライト (オーム電機: DL-1228) を用いた。テストセクション内の沸騰気泡の流れ方向の挙動の観察を行うため、側面および正面から静止画の撮影を行った。また、側面から動画の撮影を行った。気泡は 1mm 前後であるため、いずれのカメラにも標準レンズに接写リングを取り付けて接写による撮影を行った。撮影領域は、人工キャビティーから下流側に約 25~30mm, 流路間隔方向に 2mm, 流路幅方向に 20mm の領域とした。なお、可視化機器の配置は著者らの報告 (有馬ら, 2018) を参照されたい。

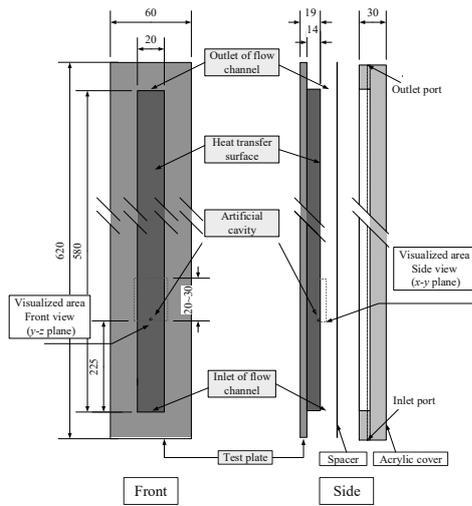


Fig. 2 Schematic diagram of the test section.

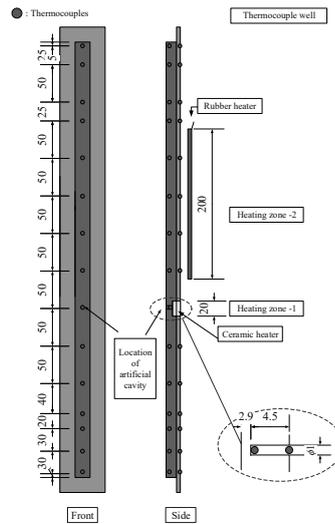


Fig. 3 Location of the thermocouple and heaters on the test plate.

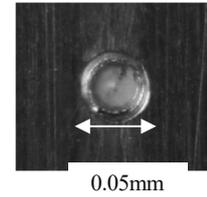


Fig. 4 Artificial cavity

3・4 実験方法

実験は以下の方法で行った。所定の質量流量を与えるため、作動流体ポンプのインバーターの出力と質量流量計の出口側にある流量調整用バルブの開度により調整を行う。次に、ボルトスライダー3でプレヒーターの入力を調整することで、テストプレート入口での作動流体の過冷度が1~6Kとなるように作動流体温度を調整する。テストプレートでは、人工キャビティー直下に設置した図1に示すヒーター1により作動流体を任意の熱流束で加熱し、核沸騰を開始させる。この時ヒーター1はボルトスライダー1で出力を調整する。また、強制対流下でキャビティーの加熱のみでの発泡は困難であったため、以下の方法で強制的に核沸騰を開始させた。任意の熱流束で伝熱面を加熱後に、一時的に作動流体の流量を減少させて人工キャビティー付近に気液界面を作る。その際に液薄膜が発生し、ここに高い過熱度を与えられることから容易に発泡を開始することができる。その後、作動流体流量を所定の値に戻すことで、連続的な核沸騰を保持することができる。発泡後の作動流体は、ヒーター2によって加熱され飽和温度を保つ。各実験条件を設定後、系内の状態点の値が10分間一定であることを確認した後デジタルスチルカメラと高速度カメラで撮影を行う。デジタルスチルカメラは連写モードで約20枚、高速度カメラは1000fpsで約1秒間撮影を行った。また同時に各状態量をデータロガーにて3分間記録を行った。

実験条件および実験により得られた状態量を表1および表2に示す。

Table 1 Experimental condition

Mass flow rate G [kg/(m ² s)]	10, 30, 40, 50
Heat flux q [kW/m ²]	30, 40, 60
Temperature of the evaporator inlet T_{in} [°C]	50.5 ~ 57.7
Pressure of the evaporator inlet P_{in} [MPa]	0.1000 ~ 0.1290

Table 2 Status value of the experiment

Temperature of the evaporator outlet T_{out} [°C]	48.3 ~ 53.4
Pressure of the evaporator outlet P_{out} [MPa]	0.0904 ~ 0.108
Local heat transfer coefficient h_{loc} [kW/m ² K]	0.67 ~ 5.74

3・5 可視化画像の解析法

実験では撮影された可視化画像を画像解析することで、気泡の挙動を定量化した。可視化ではデジタルスチルカメラによる静止画と 1000fps の高速度カメラによる動画の二種類の記録を行った。デジタルスチルカメラで得た静止画は、主に沸騰気泡の寸法の詳細な解析に用いた。また、動画については気泡の速度の解析に用いた。各画像からの解析方法の詳細については、著者らの報告 (有馬ら, 2017, Arima et al., 2017) を参照されたい。

3・6 局所熱流束, 局所熱伝達率の測定

人工キャビティーにおける局所熱流束 q_{loc} は、直下に配した 2 本の熱電対で測定された温度をそれぞれ T_1, T_2 とし、また、それらの熱電対の間隔を $l_1 = 4.5 \text{ mm}$ 、熱伝導率 $k = 17 \text{ W/mK}$ を与えたとき、次式で求めた。

$$q_{loc} = k(T_1 - T_2)/l_1 \quad (1)$$

また、熱伝達率は、式(1)で求めた局所熱流束、人工キャビティーの表面温度 T_{wall} および作動流体飽和温度 T_{sat} を用いて次式で求めた。

$$h_{loc} = q_{loc}/(T_{wall} - T_{sat}) \quad (2)$$

ここで、表面温度 T_{wall} は次式から求めた。

$$T_{wall} = T_2 - q_{loc}l_2/k \quad (3)$$

ここで l_2 は T_2 から伝熱面表面までの距離 $l_2 = 2.9 \text{ mm}$ である。

4. 結 果

4・1 気泡径の測定

図 5(a)-(d)および図 6(a)-(d)にテストセクションの側面および正面から撮影された沸騰気泡列の静止画像の一例を示す。画像は、質量流束 $G = 10, 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 、熱流束 $q = 30, 60 \text{ kW/m}^2$ の各々 2 つの条件を組み合わせた 4 つの条件についての結果を示した。図 5(a) の画像から、キャビティーで発生した気泡は、一旦そこで成長した後に離脱する。離脱後に伝熱面をスライドしながら下流に向かう (上昇する) 挙動が観察された。図 5(b),(c)についても同様な挙動が観察されたが、図 5(d)については下流側へ移動の途中で、伝熱面から離れる Lift-off (伝熱面に対する垂直上昇) が観察された。また、図 5(c),(d)については、図 5(a),(b)の気泡径に比べて、特に伝熱面から垂直方向 (y 方向) への気泡の成長が大きいことがわかる。一方、正面図の図 6(a)-(d)による観察では、図 6(c)を除いて気泡列の蛇行が観察された。

次に、これらの静止画像から解析された気泡寸法 d_x, d_y, d_z の分布について図 7(a)-(d)に示す。図 7(a)-(d)に示す全ての熱流束および質量流束条件においてキャビティーから $x < 1 \text{ mm}$ の範囲で気泡が急速に成長することで全方向成分の気泡径が増加し、その後ほぼ一定の値を示すことが分かった。また、図 7(a)および(b)の熱流束が低い条件では、同じ測定位置 x において d_x, d_y, d_z による違いはないことがわかる。つまり真球に近い形状の気泡が発生して、形状の変化なく下流に流れている。それに対して、図 7(c)および(d)の熱流束が低い条件では、 $d_x \approx d_z$ であるものの d_y の値のみ他の約 2 倍に増加していることが分かる。つまり、伝熱面から垂直な方向に成長していることを示している。

図 7 の結果をもとに、人工キャビティーからの距離 x に対する気泡寸法 d_x, d_y, d_z の相関を求めた。相関は $d = Ax^n$ のべき乗の形で表されるものとした。その結果を表 3 に示す。また、得られた相関式から求めた気泡径の値を図 7 に示す。図 7(c)では y 方向の気泡径の分布のばらつきが大きい。他の条件では、相関式が気泡径の分布をほぼ表していることが分かる。

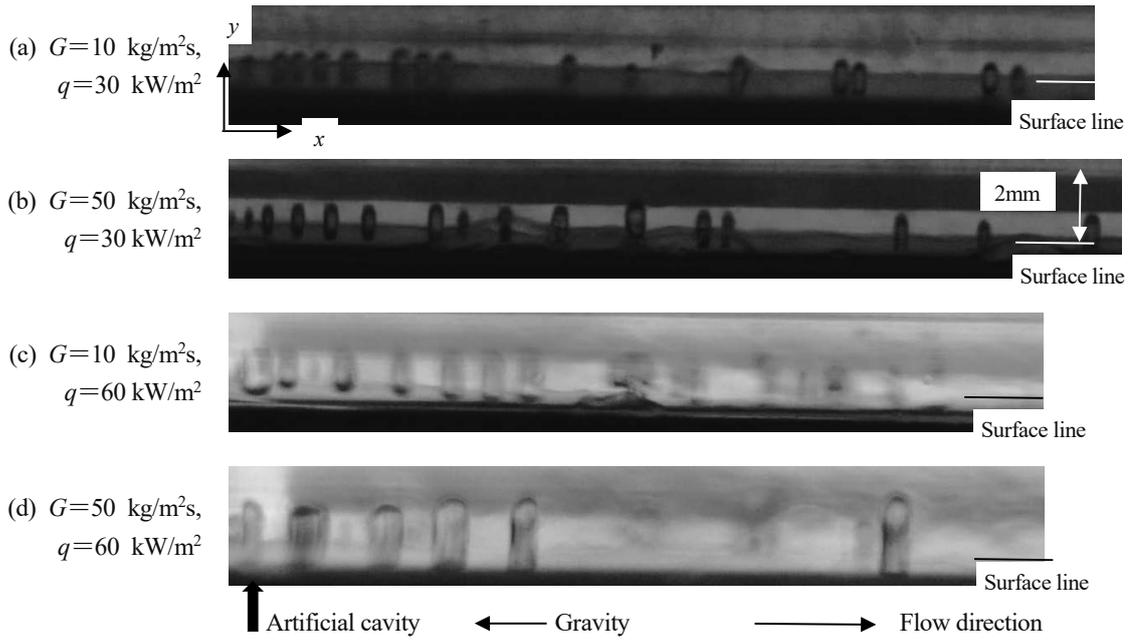


Fig. 5 Row of bubbles at the side view

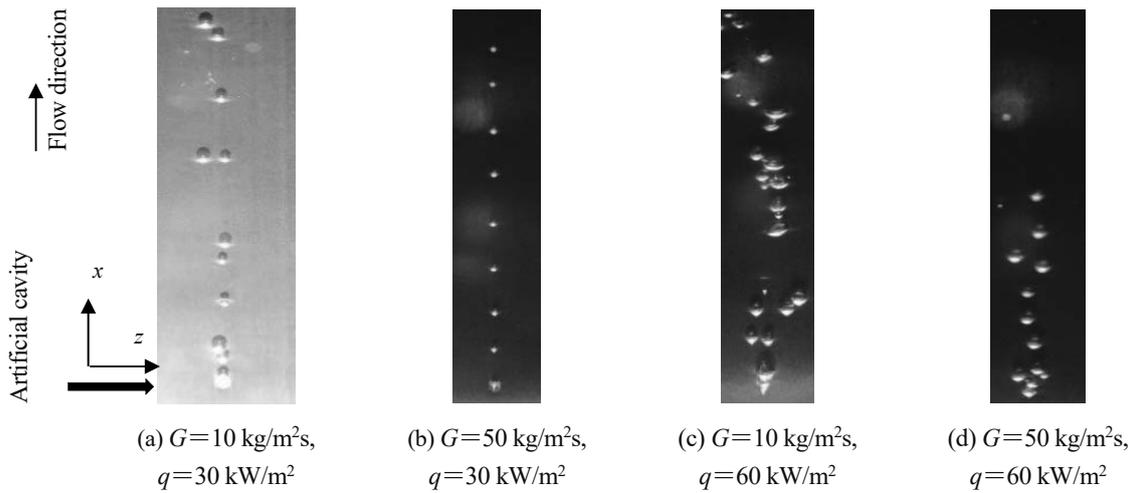
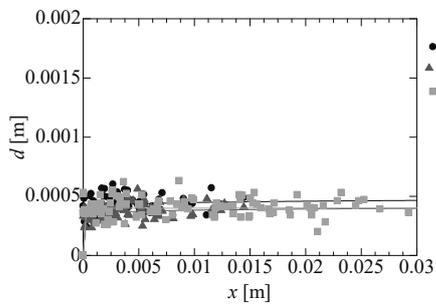
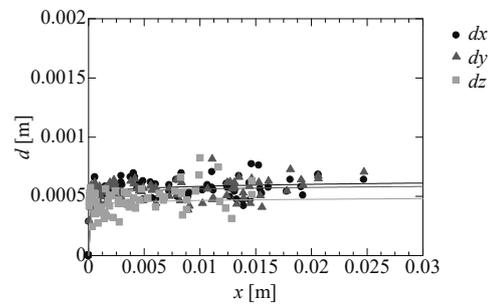


Fig. 6 Row of bubbles at the front view



(a) $G=10 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q=30 \text{ kW/m}^2$



(b) $G=50 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q=30 \text{ kW/m}^2$

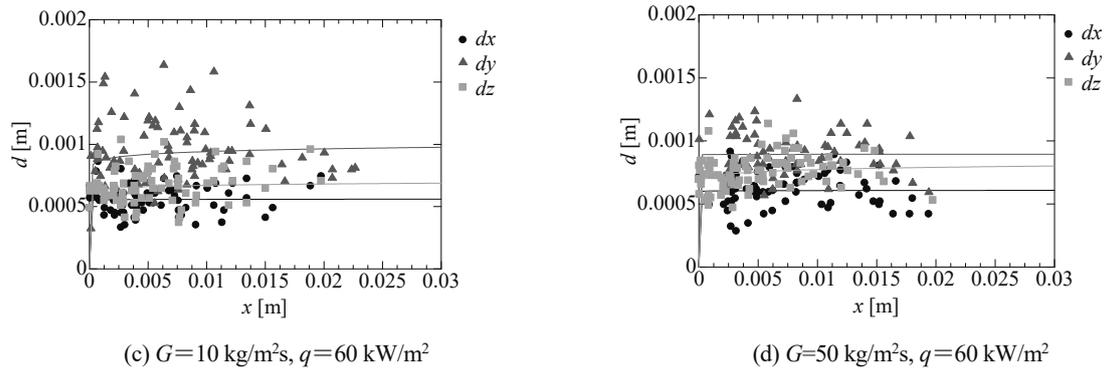


Fig. 7 Location of bubbles vs. each bubble sizes

Table 3 Correlations of the bubble size each coordinate direction

G [kg/m ² s]	q [kW/m ²]	$d_x = A_x x^{n_{Ax}}$		$d_y = A_y x^{n_{Ay}}$		$d_z = A_z x^{n_{Az}}$	
		A_x	n_{Ax}	A_y	n_{Ay}	A_z	n_{Az}
10	30	0.00053	0.03583	0.00045	0.03575	0.00040	0.00160
50	30	0.00072	0.14018	0.00061	0.11295	0.00046	0.00186
10	60	0.00057	0.00277	0.00110	0.03323	0.00074	0.02270
50	60	0.00061	0.00229	0.00090	0.00085	0.00090	0.03355

4・2 気泡の速度の分布

図 8 (a)-(d) に高速度カメラで得られた画像のスナップショットの一例を示す。画像は、図 6 (a)-(d)と同様に $G = 10, 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 熱流束 $q = 30, 60 \text{ kW/m}^2$ の合計 4 つの条件について示す。また、図 8 (a)-(d) から解析された気泡の速度分布について図 9 に示す。

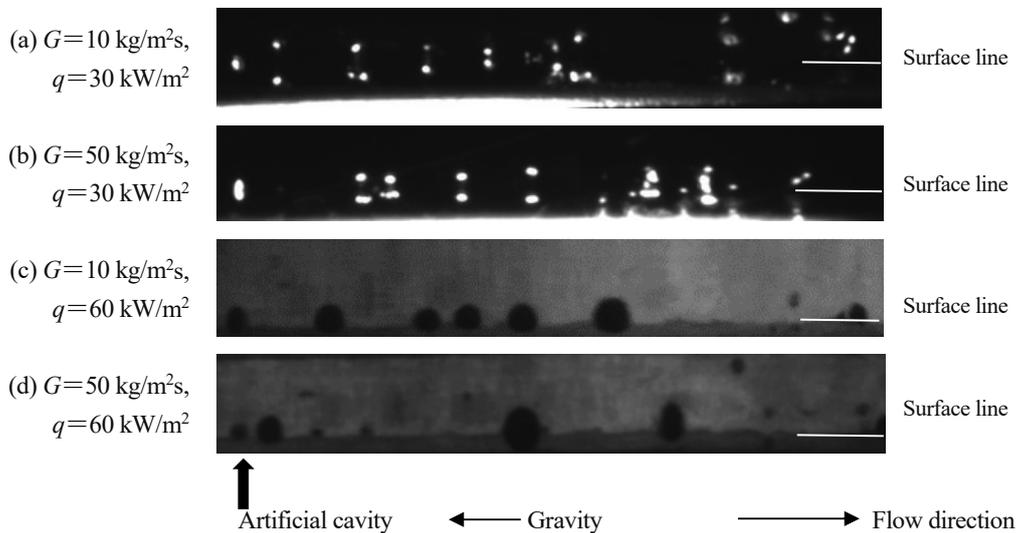


Fig. 8 Row of bubbles at the side view

図 8 (a)-(d) に示した各条件の可視化画像は、本来動画画像である。しかし、紙面の都合上、実験条件毎に 1 フレームのみ掲載した。また、これらの図は光源の照射法の違いから、図 9 (a), (b) と (c), (d) ではイメージが異なっている。前者はプレート前面から光源を照射し、後者は気泡の背面から照射した。そのため図 9 (a), (b) は伝熱面に気泡の映り込みが起こり、伝熱面を示した白線を中心に気泡列が上下対象となって観察された。

動画からは気泡の速度分布を求めた。まず、フレーム毎に個々の気泡の座標を求め、隣り合うフレーム間での移動距離を計算し、さらにフレームの時間間隔 (1/1000s) で除することで、個々の気泡の速度変化を求めた。なお、1 フレーム毎の座標変化は非常に小さかったため、5 フレーム毎に間引いて計算を行った。その結果を、移動距離 x 対速度 v および離脱からの時間 t 対速度 v の関係として図 9(a), (b) にそれぞれ示す。

図 9(a) の移動距離に対する速度変化は測定位置でばらつきはあるものの、 $G = 10 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q = 30 \text{ kW/m}^2$ の条件を除いてほぼ同一の速度変化を示していることが分かる。またその値は $G = 10 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q = 30 \text{ kW/m}^2$ の速度より速い。図 9(b) のキャビティ離脱からの時間に対する速度変化は、図 9(a) で測定した複数の気泡の内、1 個の気泡のみを時間ごとにトレースしたものであるが、やはり $G = 10 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q = 30 \text{ kW/m}^2$ とそれ以外の条件で同様の速度および速度変化の傾向を示している。

ここで、図 9(a), (b) についても相関式を求めた。4.1 節の整理と同様に、移動距離 x および離脱からの時間 t に対して速度 v がべき乗の関数となるように最小二乗法でそれぞれの係数を求めた。その結果を表 4 に示す。

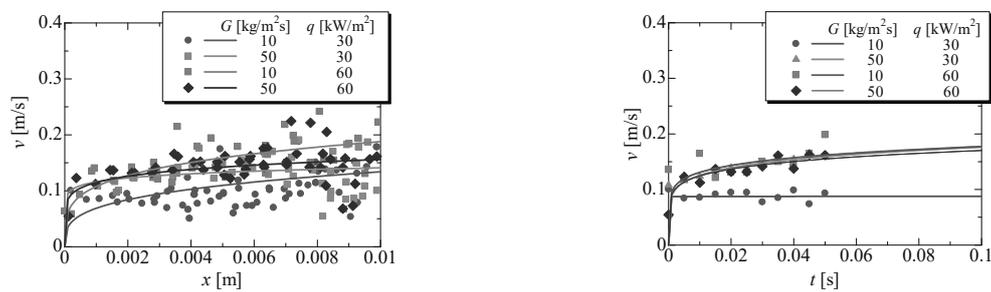
(a) Location x vs. velocity v (b) Departure time t vs. velocity v Fig. 9 Bubble velocities distributions at $G = 10, 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q = 30, 60 \text{ kW/m}^2$

Table 4 Correlations of the bubble velocity in direction

$G \text{ [kg/m}^2\text{s]}$	$q \text{ [kW/m}^2]$	$v = Bx^{n_B}$		$v = Ct^{n_C}$	
		B	n_B	C	n_C
10	30	0.509	0.289	0.088	0.0019
50	30	0.209	0.085	0.247	0.147
10	60	0.571	0.241	0.240	0.132
50	60	0.287	0.133	0.232	0.136

4・3 気泡の位置及び気泡径の相関

4.1 および 4.2 節で得られた相関式を基に、気泡径 d と離脱からの時間 t の相関式について求めた。式の導出法については著者らの報告 (有馬ら, 2017, Arima et al., 2017) を参照されたい。質量流束と熱流束の条件ごとに得られた相関式を表 5 に示す。また、相関式から得られた気泡径の経時変化について図 10(a)-(d) に青色の実線で示す。

比較のため、式(4), (5)に示す Friz (Friz, 1935) と離脱気泡直径の推算式と Plesset and Zwick (Plesset et al, 1954) の過熱液相における気泡径成長の式について、得られた相関式との比較を行った。その結果についても図 10(a)-(d) に緑と赤の破線で示す。

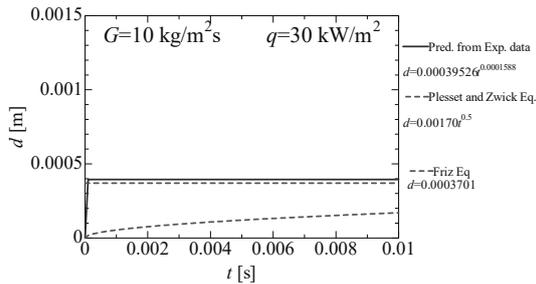
$$d = 0.0208\theta_c \sqrt{\sigma/g(\rho_l - \rho_v)} \quad (4)$$

$$d = 4 \sqrt{3/\pi} \sqrt{\alpha_l \frac{\rho_l c_p \Delta T}{\rho_v h_{fg}}} t^{0.5} = 4 \sqrt{3/\pi} \sqrt{\alpha_l} Ja t^{0.5} \quad (5)$$

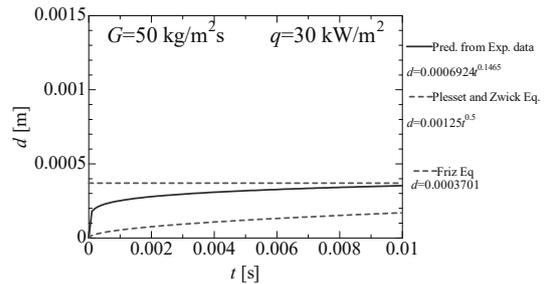
ここで、 σ は表面張力、 θ_c は接触角、 α_l は液の温度拡散率、 c_{pl} は液の定圧比熱、 h_{fg} は蒸発潜熱、 Ja はヤコブ数である。なお、接触角 θ_c は実測によって得られた値 $\theta_c = 25^\circ$ を用いた。

Table 5 Correlations of the average bubble size, d , against time, t

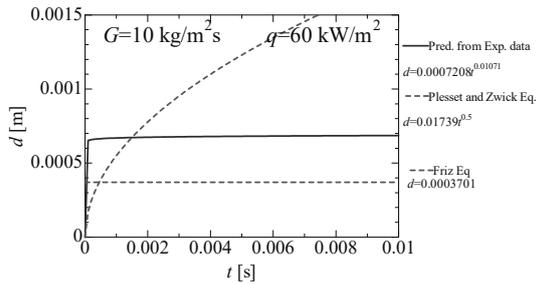
G [kg/m ² s]	q [kW/m ²]	d
10	30	$d = 3.95 \times 10^{-4} t^{0.00016}$
50	30	$d = 6.92 \times 10^{-4} t^{0.14650}$
10	60	$d = 7.21 \times 10^{-4} t^{0.01071}$
50	60	$d = 7.76 \times 10^{-4} t^{0.01255}$



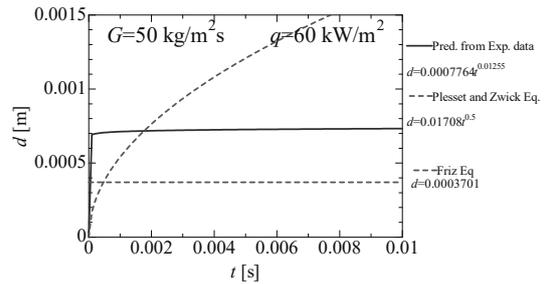
(a) $G=10\text{kg/m}^2\text{s}$, $q=30\text{ kW/m}^2$



(b) $G=50\text{kg/m}^2\text{s}$, $q=30\text{ kW/m}^2$



(c) $G=10\text{kg/m}^2\text{s}$, $q=60\text{ kW/m}^2$



(d) $G=50\text{kg/m}^2\text{s}$, $q=60\text{ kW/m}^2$

Fig. 10 Comparison between correlations and result

図 10 (a)および(b)の $q=30\text{ kW/m}^2$ の熱流束条件では、表 5 の相関式は Friz の離脱気泡径の推算式で得られる気泡径の値にほぼ漸近することが分かる。また、図 10 (b) の質量流束が高い場合は、図 10 (a) の質量流束が低い場合に比べて漸近値に達する時間が長い。質量流束が低い場合は、キャビティー上で離脱気泡径まで十分に加熱された後に離脱している。一方、質量流束が高い、つまり主流が速い場合、離脱気泡径に達する前にキャビティーから気泡が離脱し、さらに下流側に移動する間に過熱液相中で徐々に加熱され、気泡が成長すると考えられる。著者らの報告 (有馬ら, 2018) にあるように、これらの条件よりもさらに高い質量流束 ($G = 100 \sim 500\text{ kg/m}^2\text{s}$) を与えた場合、離脱気泡径はさらに小さくなり、またその成長速度は Plesset and Zwick の推算式に近づく傾向が観察されている。一方、図 10 (c)および(d)の $q=60\text{ kW/m}^2$ の高い熱流束条件では、いずれも図 10 (a)と同様にキャビティーで十分に成長した後に離脱していることが分かる。また、Plesset and Zwick の推算式で得られるような過熱液相での気泡成長の傾向は、表 5 の相関式の分布からは認められない。ただ気泡径の漸近値が Friz の値に比べて約 2 倍の値を示している原因については、今後検証を行う。

5. 結 言

人工キャビティーからの FC-72 の沸騰気泡の挙動について可視化装置による観察を行った。沸騰気泡の観察から以下のことが明らかになった。

- (1) 静止画及び動画から気泡径の分布と気泡速度の分布を画像解析によって求めた。
- (2) 得られた気泡径の分布と気泡速度の分布から、気泡の人工キャビティーからの移動距離と気泡寸法の相関、移動距離と気泡速度との相関、キャビティー離脱からの経過時間と気泡速度の相関関係について相関式をそれぞれ求め、それらをまとめることで離脱からの時間と気泡寸法の相関式を得た。
- (3) 低熱流束の場合、気泡成長後の寸法は Friz の推算式の値に漸近する。また、離脱直後の気泡の寸法は、質量流束の増加によって減少する。
- (4) 高熱流束の場合、離脱時の気泡の寸法は Friz の推算式の値に対して約 2 倍の値に漸近する。この気泡径の増加は、伝熱面に垂直な方向への気泡の成長によるものである。

文 献

- Arima, H., J.H. Kim, Okamoto, A., Ikegami, Y, "Local boiling heat transfer characteristics of ammonia in a vertical plate evaporator", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 33, No. 2, (2010), pp. 359-370.
- Okamoto, A, Arima H., Ikegami, Y., "Characteristic of local boiling heat transfer of ammonia and ammonia / water binary mixture on the plate type evaporator", *Journal of Thermal Science*, Vol. 20, No. 4, (2011), pp. 332-342.
- Arima, H., Okamoto, A., Ikegami, Y., "Local boiling heat transfer characteristics of ammonia/water binary mixture in a vertical plate evaporator", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 34, No. 3, (2011), pp. 648-657.
- 小山幸平, 中村友哉, 有馬博史, "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", *OTEC*, Vol. 19, (2014), pp. 21-26.
- 小山幸平, 中村友哉, 有馬博史, "並流型および向流型プレート式熱交換器の流動沸騰特性の比較", *OTEC*, Vol. 20, (2015), pp. 15-19.
- 有馬博史, 小山幸平, 栗田陸也, 中村友哉, "U 字型フィンを配したプレート式蒸発器の沸騰熱伝達特性", *OTEC*, Vol. 21, (2016), pp. 17-23.
- Thomcroft, G. E., Klausner, J. F., Mei, R., "An experimental investigation of bubble growth and detachment in vertical upflow and downflow boiling", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, (1998), pp. 3857-3871.
- Okawa, T., Ishida, T., Kataoka, I., Mori, M., "An experimental study on bubble rise path after the departure from a nucleation site in vertical upflow boiling", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 29, (2005), pp. 287-294.
- Jae Yong Lee, Moo-Hwan Kim, Massoud Kaviany, Sang Young Son, "Bubble nucleation in microchannel flow boiling using single artificial cavity", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 25-26, (2011), pp. 5139-5148.
- 有馬博史, 橋本敏生, 浦山尚樹, "FC-72 強制対流場における単一キャビティーからの核沸騰気泡の可視化", *OTEC*, Vol. 22, (2017), pp. 55-64.
- Arima Hirofumi, Hashimoto Toshiki, Urayama Naoki, "Visualization of Nucleate Boiling Bubbles from Single Cavity under FC-72 Forced Convection Flow", *The 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing*, (2018) PSFVIP11-110.
- 有馬博史, 山口大聖, "プレート式蒸発器伝熱面上の単一キャビティーからの核沸騰の可視化", 平成 29 年度 佐賀大学海洋エネルギー研究センター成果発表会講演論文集, (2018), pp. 5-8.
- Fritz W., "Maximum volume of vapour bubbles", *Physik Zeitschr.*, Vol. 36, (1935), pp. 379-384.
- Plesset, M. S., Zwick, A., "The Growth of Vapor Bubbles in Superheated Liquids", *Journal of applied physics*, Vol. 25, (1954) pp. 493-500.