

微細矩形管内気液二相流流動の可視化

2018年3月修了

人間環境学専攻 47-166714 水野勇輝

指導教員 党超鋌 准教授

This research addresses the two-phase flow, especially slug flow characteristics inside a microscale rectangle tube. By analyzing the pictures obtained from a high-speed camera through a microscope, the state of phase change and the velocity profile in liquid can be constructed which is essential for understanding the flow and heat transfer performance of two-phase flow. In this research, by using micro PTV, the state of dryout can be observed in the heated flow path by applying current to the glass tube coated with transparent conductive film.

Key words: Microchannel, Micro PTV, Two-phase Flow, Slug-Flow

1 緒言

微細加工技術の向上を背景に、1980年代頃から熱交換器内配管の細管化への注目が始まった。細管化された熱交換器の大きな特徴は、冷媒と管内壁の触れる面積、すなわち伝熱面積が大きいためである。これにより同等の熱交換能力を求めるとすれば、細管化された熱交換器の方が小型化でき、冷媒充填量の削減もできる。ただ一方で、細管化には圧力損失の増大も伴う。流動抵抗が大きくなれば必要な動力も大きくなるため、単純に細管化すれば良いというものでもない。そこで、微細管内流動特性から熱交換器の更なる高性能化への手掛かりを見出したいところである。

近年注目されている熱交換器として、扁平多孔管熱交換器がある。この熱交換器は流路形状の設計に自由度を持っている。一般的に、扁平多孔管熱交換器ではその設計の自由度を利用して、矩形流路を採用しているものが多い。というのも、同じ冷媒流量であった場合、矩形流路の方が円形流路よりも伝熱面積が大きくなるからである。しかし一方で、微細矩形管内の流動に関する報告の数は未だ少ない。熱交換器の更なる性能向上のためにも、微細矩形管内流動を把握することが求められている。熱交換器分野においては、熱交換器の細管化やコンパクト化を目指す開発に注目が向けられている。これらは熱交換器内の冷媒充填量の削減に繋がるので、環境への負荷の低減にも繋がることとなる。しかしながら、マイクロチャンネル内における冷媒の気液二相流流動特性に関する報告は数が多くなく、その様相は未だ十分に把握されていないままである。本研究では、その流動特性を知ることによって熱交換器の更なる高性能化への手掛かりを見出すことを目的とする。

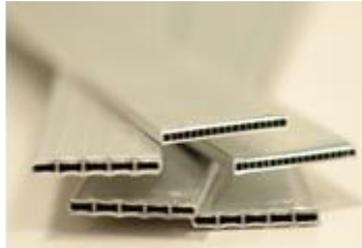


Fig.1. Flat perforated tube

2 従来研究

微細管内における気液二相流では、円形ではなく矩形の流路の方が伝熱を向上させることが一般に知られている。しかし矩形流路においては、広い条件に適用できる伝熱相関式や伝熱モデルの提案はされていない。

榎木⁽¹⁾は、水力直径 1 mm 程度の円形、矩形、三角形流路において冷媒 R-410A を用いた二相流の可視化と熱伝達率測定の実験を行った。実験条件は、質量速度 100 kg/m²s、熱流束 2-20 kW/m² である。そこで円形流路

よりも矩形流路の方が熱伝達率が高いことを確認した。この結果に対し榎木らは、矩形流路の角部へ液が集まって辺中央部の液膜が薄くなり、この薄い液膜の蒸発が伝熱を促進させると結論付けた。同時に、矩形流路にて低熱流束の方が熱伝達率が高い場合があることも確認している。

田中⁽²⁾は、水力直径 0.9 mm の矩形管にて HFO-1234yf を用いた二相流の可視化と熱伝達率測定の実験を行った。実験条件は、質量速度 60-120 kg/m²s、熱流束 4-16 kW/m² である。そこで、矩形流路で生成される液膜は非常に薄く、熱流束が大きい時ドライパッチが発生する頻度の上昇を確認した。この結果に対し、ドライパッチの発生部分は伝熱が促進されず、これが低熱流束ほど熱伝達率が高くなることに寄与すると結論付けた。同時に、矩形流路にて低流量ほど熱伝達率が高いことも確認している。この結果に対して、気液界面での張力と剪断力の関係から低流量ほど薄い液膜を生成し、これが伝熱を促進していると結論付けた。

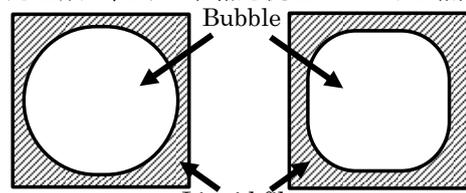


Fig.2 Relationship between flow rate and cross-sectional shape in rectangular channel

(2)

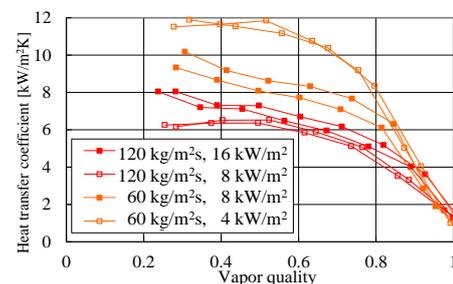


Fig.3 Relationship between mass velocity, heat flux, heat transfer coefficient and quality in the rectangular

3 研究目的

熱交換器の細管化が注目されているのは前述の通りである。そこで、微細管の中でも特に報告の少ない矩形管内の二相流流動を調査し、熱交換器の更なる高性能化への手掛かりを見出すことを本研究の目的とする。行う実験は大きく分けて以下の二つである。

一つ目は、マイクロ PTV という手法で水平な 1 mm 正矩形管内の液单相流の流速の測定実験である。单相流は既に流動が把握されているため、理論式との比較をしてその精度を確認し、気液二相流に応用するための準備を行う。

二つ目は、水平な 1 mm 矩形管内の二相流流動を可視化する実験である。撮影された様相と既に確認されている現象との関連付けをして考察する。

4 マイクロ PTV

PTV (particle tracking velocimetry : 粒子追跡法)とは、ある平面における、流れに混入させた粒子の像を連続して撮影することで流速を算出する方法である。画像上の個々の粒子像を抽出し、それぞれの移動量を解析する。

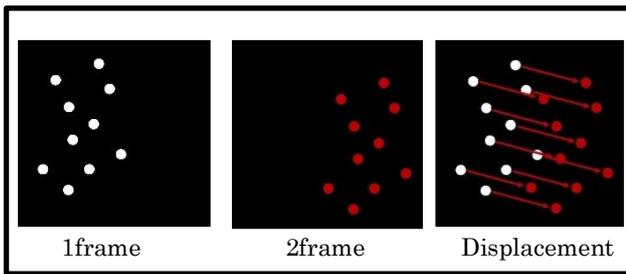


Fig.4 PTV

また本研究では、PTV の中でもマイクロ PTV を用いる。マイクロ PTV とは、PTV の視野範囲を顕微鏡を用いて微小化したものを指す。通常の PTV の場合、図 5.のように厚さ数 mm 程度のシート光を作る。これによって励起された蛍光粒子のみをカメラで感知できるようにすることで、平面とみなして撮影する。一方マイクロ PTV の場合、被写界深度未満のシート光を作るのが難しい。というのも、本研究で使用するレンズを例に挙げると、10 倍程度の拡大で被写界深度は数十 μm 程度になってしまうからである。よってシート光を作ったでは平面とみなすことはできない。しかし、顕微鏡を通して撮影するため被写界深度が非常に浅くなるので、全体照射してもシート光と同じ効果を得たとみなすのが一般的である。また、マイクロ PTV の特徴としてカメラに向かって発せられる透過光によってできた粒子の影を撮影することができることも挙げられる。なお、本研究では粒子影を撮影するマイクロ PTV を用いる。

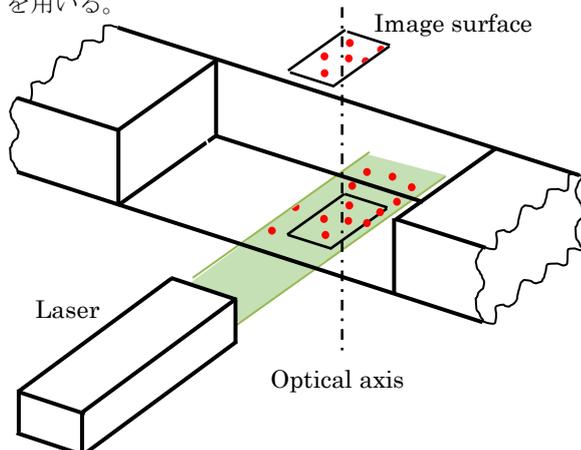


Fig.5 How to irradiate particles

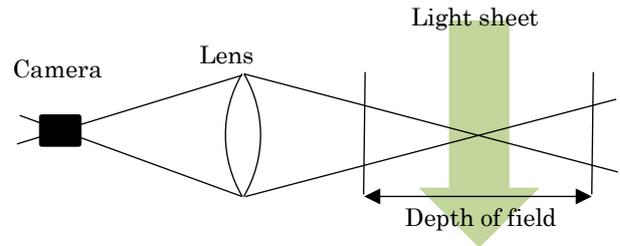


Fig.6 Relationship between light sheet and depth of field

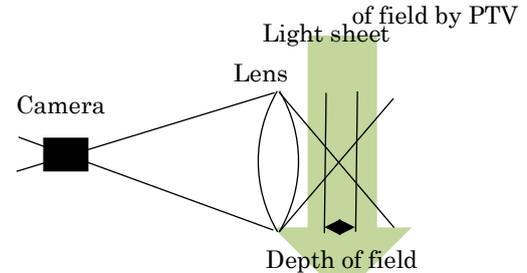


Fig.7 Relationship between light sheet and depth of field by PTV

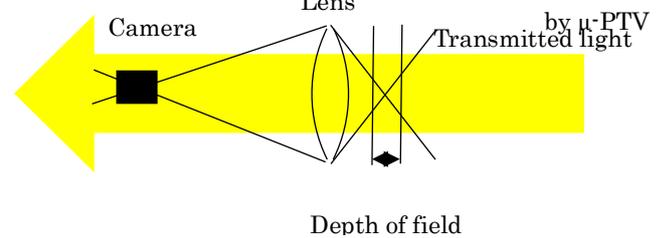


Fig.8 Relationship between transmitted light and depth of field by μ -PTV

5 マイクロ PTV の精度評価

マイクロ PTV の気液二相流への適用事例の報告は少ない。そこで、気液二相流に適用できる流体と粒子の組み合わせを模索し、单相流にて測定精度を確認してから二相流へ応用する。なお、本研究では流体として HFE-347pc-f を、粒子としてメラミン・ホルムアルデヒド縮合物を用いる。この流体を選定した理由は、沸点が常温よりも少し高い値であるため加熱系の二相流を作りやすいと判断したからである。この粒子を選定した理由は、この流体と化学的親和性が高く、液体内に分散できるからである。この二つは非常に近い密度でもある。

図 9.に実験装置の概略図を、図 10.に実験装置全体の写真を、図 11.に軸の取り方を、図 12.に撮影位置を、図 13.に石英ガラス管を示す。

流路内の速度分布は、Navier-Stokes 方程式を流路の断面形状を境界条件とすることでして解くことによって得られる。正矩形流路での層流の流速分布を表す場合次式が得られている。^③ 以後の单相流における流速の理論値とは式(1)から算出したものを指す。

$$U_x = \frac{113.6Q}{\pi^3 w^2} \sum_{k, \text{odd}} \left[\frac{1}{n^3} \left\{ 1 - \frac{\cosh\left(\frac{n\pi}{2} \frac{w-2y}{w}\right)}{\cosh\left(\frac{n\pi}{2}\right)} \right\} \sin\left(n\pi \frac{z}{w}\right) \right] \quad (1)$$

U_x :流路方向速度 m/s, Q :流量 m^3/s , w :水力直径 m
 y :側面からの距離 m, z :上面からの距離 m.

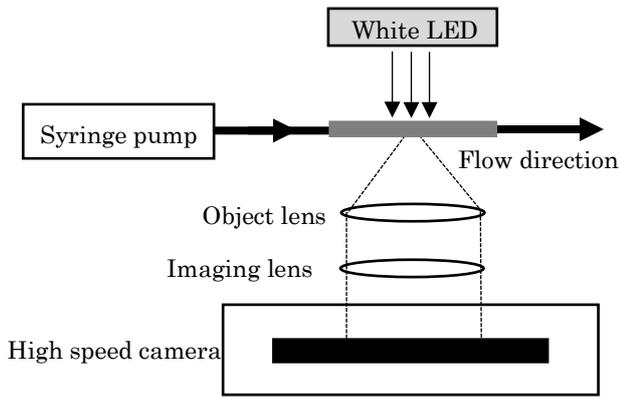
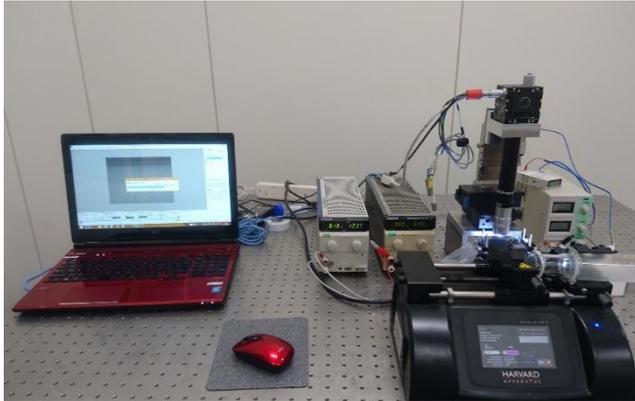
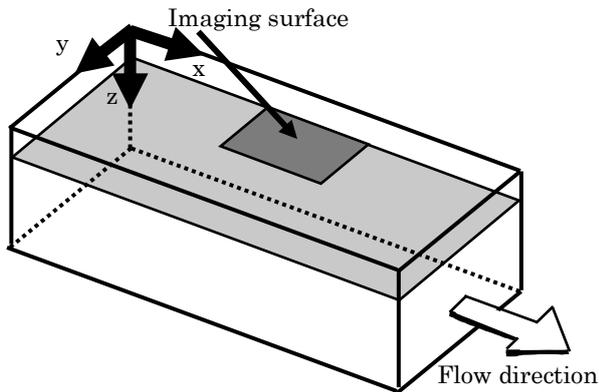


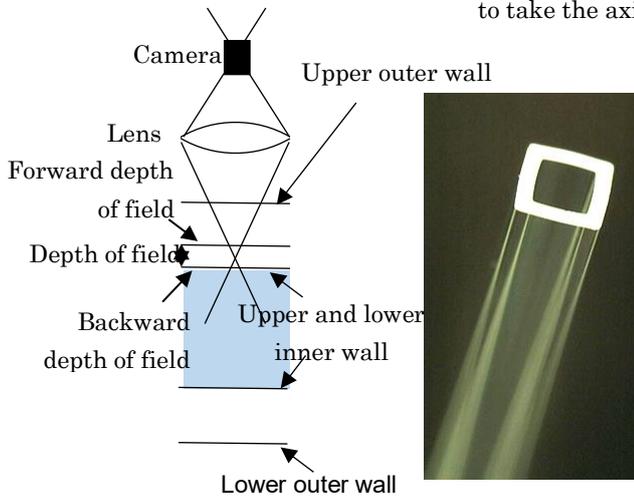
Fig.9 Summary of device for taking photos



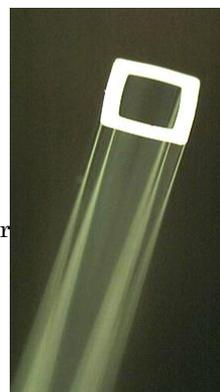
F.10 Experiment equipment



F.11 The position of the observation surface and how to take the axis



F.12 Observing z=0 plane



F.13 Microchannel

次にマイクロ PTV による微細矩形管内单相流の流速測

定結果を示す。なお、拡大倍率 10 倍での撮影であり、グラフ中の理論値には前方被写界深度及び後方被写界深度の両方を考慮した。

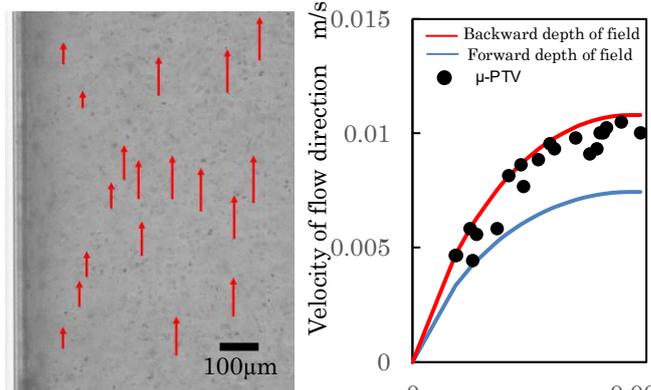


Fig.14 Single-flow(mass velocity :17.3kg/m²s,distance from upper inner wall:0.0001m)

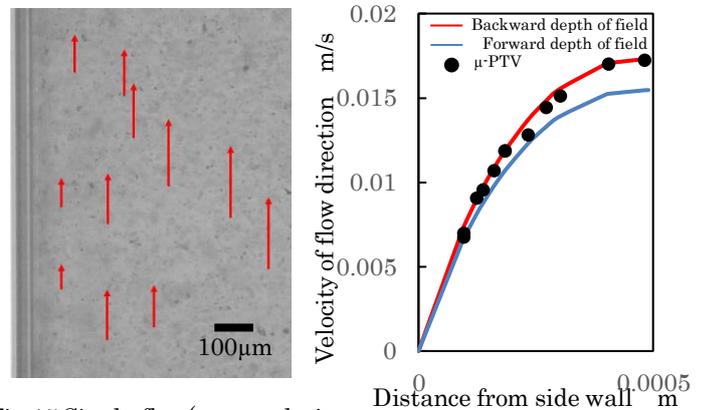


Fig.15 Single-flow(mass velocity :17.3 kg/m²s,distance from upper inner wall:0.0002 m)

図 14、図 15 より実験値は、後方と前方の被写界深度位置から計算した理論値の間におおよそ収まった。

6 気液二相流流動の可視化

矩形管の外壁へ塗布した透明導電膜へ通電し発生する熱を用いて管内流体の加熱を行いながらスラグ流の可視化を行う。管内壁でのドライアウトの様子の観察、マイクロ PTV による液体流速の測定を行った。

図 16.に実験装置の概略図を、図 17.に透明導電膜を塗布したガラス管の写真を、図 18.に本実験での観察対象であるスラグ流(乾き度 0.15)の時の写真を示す。

以下に示す結果は流路入口での乾き度が 0.15 の二相流において辺中央部でドライアウトが発生する様子を 5 倍拡大で撮影したものである。熱流束は 4-12 kW/m²、質量流量は 60-120 kg/m²s、流路方向の測定位置は 0-40 mm の間で変化させた。時間のパラメータは気泡の頭部が撮影範囲下端を通り過ぎ終わった瞬間を 0 として、ドライアウト開始時刻と気泡尾部通過時刻を示す。またマイクロ PTV を用いて液膜内流速と気泡間液相内流速の分布を測定結果も示す。なお、液膜内と気泡間液相内の速度ベクトルのオーダーは一桁異なる。

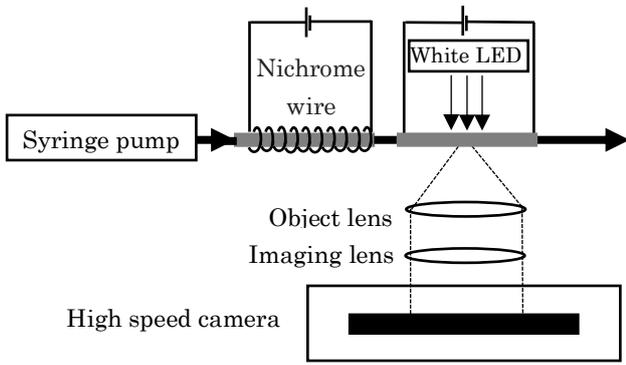


Fig.16 Summary of device for taking photos

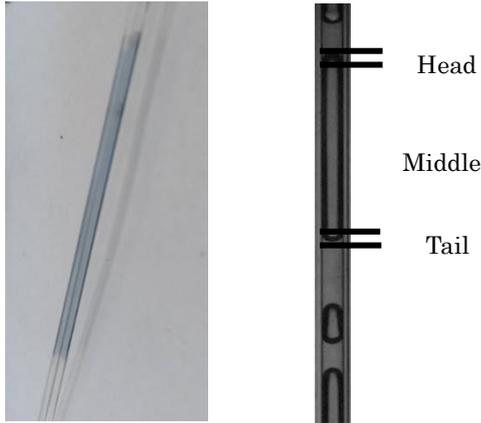


Fig.18 Slug-flow

Fig.17 Microchannel coated coated with the transparent conductive

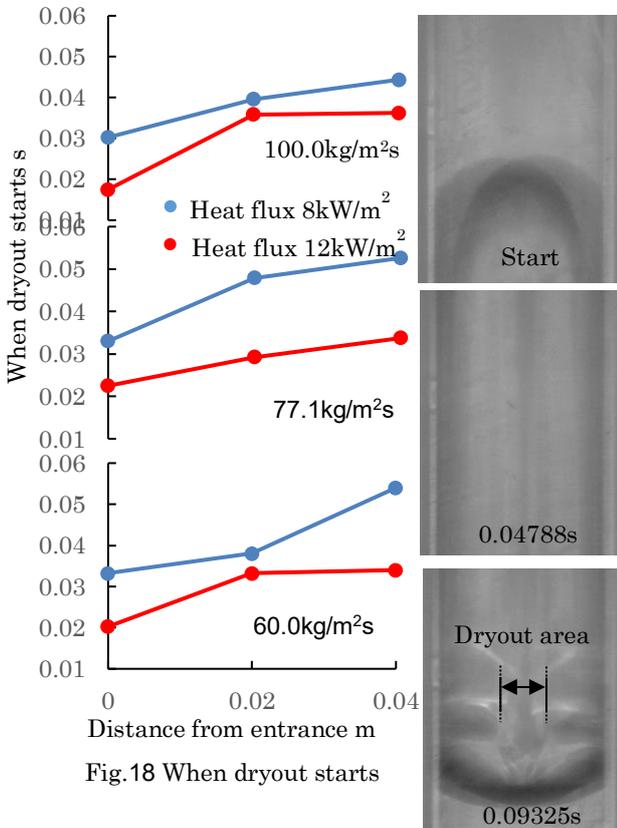


Fig.18 When dryout starts

Fig19. State of dryout(mass velocity:77.1 kg/m²s, quality:0.15, distance from entrance:0.02 m, Distance from upper inner wall:0m, Heat flux:8 kW/m²)

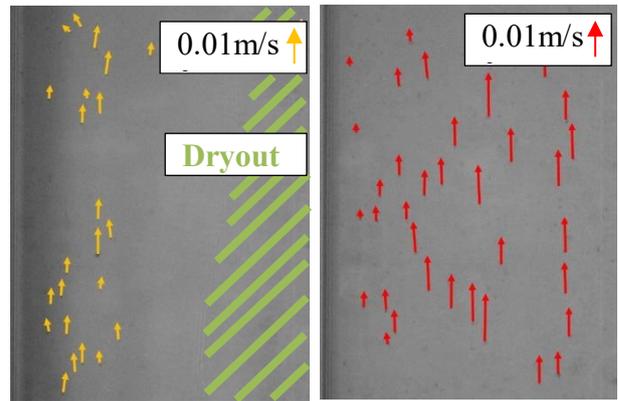


Fig.20 Movement of particles in liquid

熱流束 $4 \text{ kW/m}^2\text{s}$ の場合、ドライアウトが発生しなかった。熱流束 $8\text{-}12 \text{ kW/m}^2\text{s}$ の場合、流路方向に進むほど、すなわち乾き度が大きくなるほどドライアウトが発生するまでの時間が遅くなった。乾き度が大きくなれば流体中の気体の割合は大きくなるのだが、気泡の速度も速くなるので流路辺中央部の液膜が厚くなり⁽²⁾ドライアウトが発生しにくくなっていたと予測できる。

マイクロ PTV により、液膜と気泡間液相内流速を比較した。液膜内ではどの条件でも気泡間液相と比較するとほとんど動きがないということが確認できる。全体の質量速度によらず、液膜内は流速が非常に小さく強制対流による熱伝達をほとんど見込めないことが分かった。田中の実験⁽²⁾で報告されている、流量が変化した場合の熱伝達率への影響は液膜の厚さが支配的となる、ことの裏付けとなった。

7 結論

1. メラミン・ホルムアルデヒド樹脂粒子は HFE-347pc-f の動きに追従しているといえる。この組み合わせでのマイクロ PTV による流動解析結果への妥当性を証明した。
2. マイクロ PTV により、スラグ流の液膜内は流速が小さく、強制対流による熱伝達が見込めないことが確認された。
3. ドライアウトを起こした矩形管内壁は、気泡と気泡の間に存在する液相によって再び濡らされる。また、ドライアウトを起こす前に気泡間の液相が壁面を通過すれば壁面は継続的に濡れ続けることができる。気泡の通過時間や液膜厚を予測できればドライアウトを起こさない二相流流動にできそうではあるが、まだ広い範囲に適用できる微細矩形管内の伝熱モデルは提案されていない。更なる、矩形管内流動特性の把握が必要とされる。

文献

- (1) Koji Enoki, et al. Boiling Heat Transfer and Pressure Drop of a Refrigerant Flowing Vertically Upward in Small Rectangular and Triangular Tubes. Heat Transfer Engineering. 2013, vol.34, nos.11-12, p.966-975.
- (2) 田中千歳. 扁平多孔管内流動沸騰の伝熱特性. 東京大学. 2014, 博士論文
- (3) Henrik Bruus. Theoretical microfluidics. Oxford University Press. 2007.