

狭い水平環状すきま内におかれた円管まわりの 蒸気泡流動と局所熱伝達率について

今野好敬*・土田 一

Bubble Flow and Boiling Local Heat Transfer around Tube in Narrow Horizontal Annular Clearance

Yoshitaka KONNO* and Hajime TSUCHIDA

(2001年11月30日受理)

An experimental investigation of bubble flow and boiling local heat transfer of saturated R11 has been conducted with a horizontal cylinder which is 57.5 mm in diameter, and is enclosed by concentric outer tubes. These outer tubes have two holes which are 3 mm in width and 20 mm in long, and which are 3 mm in width and 60 mm in long. The clearance (c) between these tubes ranged from 0.2 mm to and heat flux of stainless heater (q_{sus}) from 300 to 3000 W/m². Heat flux of copper heater (q_{c}) is changed from 0.1×10^6 to 5.9×10^6 W/m². The close relationship of local heat transfer characteristic and bubble flow is demonstrated in this report.

1. 緒 言

近年、省エネルギー化、新エネルギーの開発など熱エネルギーの有効利用が重要視されている。特に、産業・民生等で使用されているエネルギーの約80パーセントが化石エネルギーによってまかなわれており、今後も化石エネルギーの消費が続くことが考えられる。このことは、地球環境におよぼす影響さらには資源の枯渇問題につながることから、太陽熱や海洋温度差など自然エネルギーの利用法が最重要課題となっている。

また、それらのエネルギーを利用するためには、熱交換を行なわせる装置が必要不可欠である。熱交換器は一般に流体間で熱交換を行わせる装置であるが、自然エネルギーなど小温度差を利用して熱交換を行うためには、伝熱面積の増大を極力抑える必要性から、熱交換器の性能向上が重要課題となっている。とりわけ相変化を伴う熱交換器の高性能化、コンパクト化という観点から小温度差で、沸騰熱伝達を効果的に行わせるための一手段として、通常の平滑伝熱面に狭い空間あるいは狭い流路を形成した場合、その沸騰熱伝達は一般的に伝熱面熱流束が比較

的小さい領域において通常のプール沸騰に比較し向上することが知られている。このことから、従来より垂直伝熱面^{(1),(2)}あるいは水平伝熱面⁽³⁾に形成される狭い沸騰空間内の沸騰熱伝達に関する研究が多く行われている。狭い空間内におかれた水平円管まわりの沸騰熱伝達に関する報告は、Hung⁽⁴⁾、石橋⁽⁵⁾、土田ら⁽⁶⁾にみられる。Hungらは限界熱流束に関しモデル化を試み相関式を提唱、石橋らは合体泡領域における沸騰現象について詳細な報告をしており、いずれの場合も周囲液体の流入と発生蒸気泡の抜けが円管軸方向となっている。また、土田らの場合、伝熱面から発生する気液の抜けおよび新鮮液体の流入が円周方向となるようにし、上下に円管軸と平行な細長い開口部を有する円管内に伝熱管を取付け、2円管で構成される環状すきまを極めて狭い範囲まで変化させ、自然対流域から核沸騰域までの狭い沸騰空間内の伝熱特性を明らかにしている。

これらの伝熱促進の機構としては、伝熱面に接している、蒸気泡底部に形成される、薄液膜を介しての蒸発⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾と、蒸気泡による伝熱面近傍の過熱液の強制はく奪⁽⁶⁾の2つに大別されるが、いずれの場合も発生蒸気泡の影響によるものであり、それぞれのすきま寸法や伝熱面熱流束により異なるが、ある領域で沸騰熱伝達が促進されることが報告されている。

* 秋田工業高等専門学校専攻科学生

狭い水平環状すきま内におかれた円管まわりの蒸気泡流動と局所熱伝達率について

しかし従来の研究結果は伝熱面全体の平均値として沸騰熱伝達が評価されているが、沸騰現象においては沸騰空間内で対流が起こり、伝熱面から蒸気泡が発生することから伝熱面の各位置によって沸騰熱伝達に相違があると予想される。特に熱伝達の低下が発生している部分では、伝熱面温度の上昇により破損に至ることが懸念される。

このような背景より本研究では、太陽熱を利用した吸収式冷凍機、海洋温度差発電用蒸発器等に用いる管胴型蒸発器の性能向上に関し、局所的な熱伝達制御という観点から水平円管の伝熱系を取り上げた。すなわち、上下に円管軸と平行な開口部を有する円管内に伝熱管を同心円状に取付け、伝熱面より発生する気液の抜けおよび新鮮液体の流入が円周方向となるように考慮し、2円管で構成される環状すきまを極めて狭い範囲まで変化させ、狭いすきま内における蒸気泡の流動状況を詳細に観察するとともに蒸気泡の流動が局所沸騰熱伝達率におよぼす影響を実験的に明らかにするための基礎的研究を行った。

2. 主な使用記号

- c : 伝熱管と干渉管内面との環状すきま [m]
- d : 供試伝熱管直径 [m]
- D : 局所熱伝達測定用ステンレス箱ヒータ幅 [m]
- E_{cu} : 電圧 [V]
(蒸気泡発生用銅製ヒータ)
- E_{sus} : 電圧 [V]
(局所熱伝達測定用ステンレス箱ヒータ)
- I_{cu} : 電流 [A]
(蒸気泡発生用銅製ヒータ)
- I_{sus} : 電流 [A]
(局所熱伝達測定用ステンレス箱ヒータ)
- L : 局所熱伝達測定用ステンレス箱ヒータ長さ [m]
- Nu_{θ} : 局所ヌセルト数 = $\alpha_{\theta} \cdot d / \lambda$
- Num : 平均ヌセルト数
- Q_{cu} : 供給熱量 [W] = $E_{cu} \cdot I_{cu}$
(蒸気泡発生用銅製ヒータ)
- Q_{sus} : 供給熱量 [W] = $E_{sus} \cdot I_{sus}$
(局所熱伝達測定用ステンレス箱ヒータ)
- q_{cu} : 伝熱面熱流束 [W/m^2] = Q_{cu} / S
(蒸気泡発生用銅製ヒータ)
- q_{sus} : 伝熱面熱流束 [W/m^2] = $Q_{sus} / (D \cdot L)$
(局所熱伝達測定用ステンレス箱ヒータ)
- S : 蒸気泡発生用銅製ヒータ伝熱面積 [m^2]

- T_s : 被加熱流体の飽和温度 [K]
- T_w : 伝熱管表面温度 [K]
- α_{θ} : 局所熱伝達率 [$W/(m^2 \cdot K)$] = $q_{sus} / \Delta T_{sat}$
- θ : 試験部鉛直下方向を 0° として定義した蒸気泡観察位置 [deg.]
- θ_T : 試験部鉛直下方向を 0° として定義した熱電対取付け位置 [deg.]
- ΔT_{sat} : 過熱度 [K] = $T_w - T_s$
- λ : 液体の熱伝導率 [$W/(m \cdot K)$]

3. 蒸気泡流動特性

前述したように、伝熱面より発生した蒸気泡の流動の影響により、その沸騰熱伝達は局所的に差異があると推測される。特にこれまでの報告⁽⁷⁾から、水平伝熱管を外側円管で同心円状に覆った場合、主に伝熱管下部近傍より蒸気泡が発生することが確認されている。このことから、伝熱管下部から発生させた蒸気泡の狭い環状すきま内における流動特性を明らかにする目的で以下のような実験的研究を行った。

3.1 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図1に示す。沸騰容器①は幅130 mm、高さ160 mm、奥行き130 mmのステンレス板製直方体である。試験部⑥は、その中心が沸騰容器底部より80 mm上方となるようにフランジに片持ちで固定し、伝熱面より発生した蒸気泡は凝縮器④で凝縮され、予熱管⑤を通して沸騰容器①へほぼ飽和状態で戻される。なお、試験部の下方20 mmの位置に被過熱流体温度測定のため、直径0.5 mmの銅—コンスタンタン熱電対が取り付けられている。

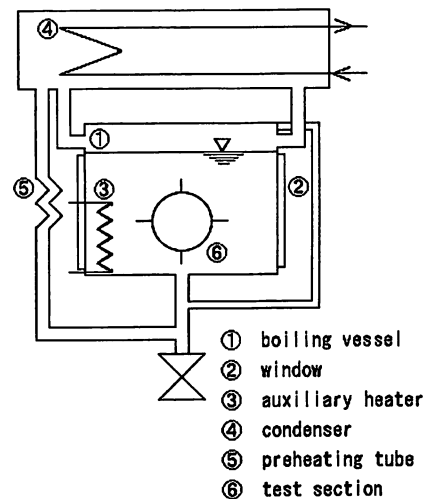


図1 実験装置概略

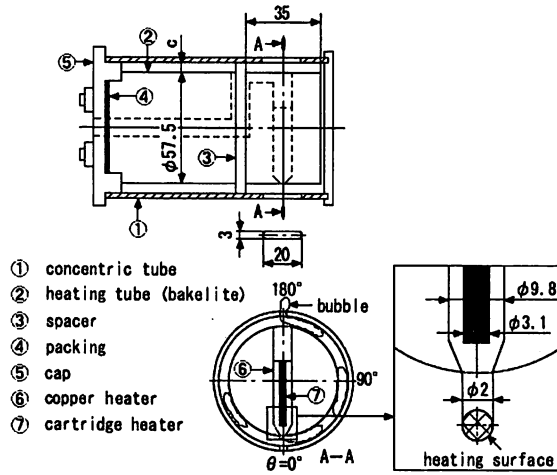


図2 試験部概略

図2は、蒸気泡流動可視化用試験部を示したものである。外径57.5 mmとしたベークライト製の非加熱の丸棒②（以後伝熱管と呼称する）に、蒸気泡発生用として、外径3.1 mmのカートリッジヒータ⑦を装入した、外径9.8 mmの銅製ヒータ④の伝熱面（ $\phi 2$ ：以後蒸気泡発生用伝熱面と呼称する）を、伝熱管鉛直下方向表面に一致させるように埋め込み、間接電気加熱により伝熱面に熱流束を与えた。また、蒸気泡発生用伝熱面熱流束 q_{cu} は、 $0.1 \times 10^6 \sim 5.9 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ の範囲とした。なお、 q_{cu} に関しては、蒸気泡の流動観察を主眼としており、ここでは伝熱面以外への伝導による熱損失は考慮していない。伝熱面より発生した蒸気泡の流動状況は、円管側面および円管軸方向から3-CCDビデオカメラで可視化撮影をし、画像解析装置(DIG 98 SPA-1 ver.2.07)を用い解析を行った。ここで、蒸気泡観察位置 θ は伝熱管鉛直下方向を 0° としている。

試験部は、蒸気泡流動可視化のため、すきま寸法 c が0.2, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 mmとなるようにアクリル樹脂製の透明な円管①（以後干渉管と呼称する）を製作・加工し、伝熱管表面を同心円状に覆い沸騰空間を形成した。また、干渉管には蒸気泡の抜け及び周囲液体の流入が円周方向となるように、上下に長さ20 mm、幅3 mmの開口部を設けた。実験は、被加熱流体にフロン系冷媒 R 11を使用し、大気圧下、飽和沸騰のもとで行った。

3.2 蒸気泡発生周期

図4は、伝熱管中央部（ $\theta = 90^\circ$ ）近傍を通過する蒸気泡数を、ビデオ撮影により計測し、単位時間(1 sec)当たりの蒸気泡通過周期として表したもので、

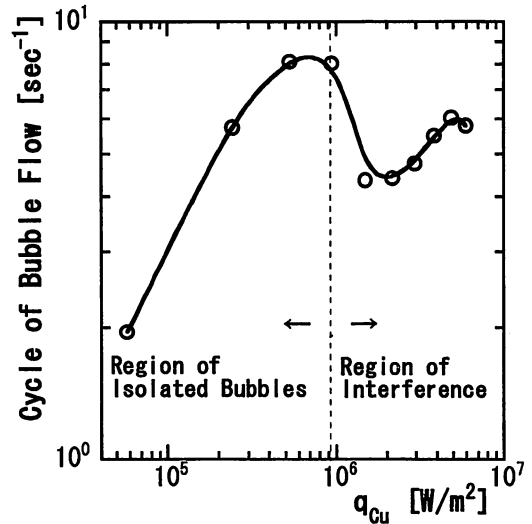


図3 蒸気泡流動周期

縦軸に蒸気泡通過周期、横軸に q_{cu} をとり示した。 $q_{cu} \leq 0.9 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ では、伝熱面より発生する蒸気泡は単独泡であり、 q_{cu} の増加に伴い発生量も増加するため周期も増加している。しかし、 $0.9 \times 10^6 \text{ W/m}^2 < q_{cu} \leq 2.0 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ では、単独泡として発生した蒸気泡が伝熱面より離脱後、ただちに次に発生した蒸気泡と合体するため、 q_{cu} の増加に伴い、その周期は低下する。 $q_{cu} > 2.0 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ になると、伝熱面上で蒸気泡が合体し、その発生量も多くなるため再び増加する。これらのことから本実験範囲内では、 $q_{cu} \leq 0.9 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ を低熱流束域（独立蒸気泡領域）、 $0.9 \times 10^6 \text{ W/m}^2 < q_{cu} \leq 2.0 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ を中熱流束域（独立蒸気泡同士が離脱後合体する領域）、 $q_{cu} > 2.0 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ を高熱流束域（合体蒸気泡領域）とそれぞれ定義する。

3.3 蒸気泡流動特性の分類

図4および図5は、 $c = 0.2, 0.5, 1.0 \text{ mm}$ の場合における蒸気泡成長過程を、 q_{cu} が低熱流束域、高熱流束域の場合についてそれぞれ示している。これらの図および既報⁽⁶⁾に示した蒸気泡体積の経時変化蒸気泡流動観察より、本実験範囲の伝熱面熱流束 q_{cu} およびすきま寸法 c において、その蒸気泡流動は3つの流動様相に分類されることが明らかとなった。すなわち、蒸気泡の流動様相は伝熱面熱流束 q_{cu} とすきま寸法 c との関係で分類されることから、それぞれの流動様相を領域ごと一括して図6に示した。

流動様相1 (type 1)として、 $c = 0.2, 0.3 \text{ mm}$ の全熱流束域および $c = 0.5 \text{ mm}$ の中・高熱流束域が

含まれる。この領域は、他の領域に比較し多くの蒸気泡が伝熱面近傍で合体するため、狭いすきま内で円周方向に大きく成長した後離脱することが特徴である。

流動様相 2 (type 2) として、 $c = 0.5 \text{ mm}$ の低熱流束域および $c = 1.0, 2.0 \text{ mm}$ の中・高熱流束域が含まれる。この領域は、流動様相 1 ほど蒸気泡が円周方向に成長せずに離脱し、離脱後の成長がほとんど見られないことが特徴である。

流動様相 3 (type 3) として、 $c = 1.0, 2.0 \text{ mm}$ の低熱流束域および $c = 5.0 \text{ mm}$ の全熱流束域が含まれる。この領域は、干渉管をつけない場合とほぼ同様の流動様相で、蒸気泡発生後すぐに離脱するため蒸気泡がほとんど成長しないことが特徴である。なお、伝熱面熱流束が大きくなり合体蒸気泡領域に到達すると、上部および下部開口部近傍に蒸気泡が充満する現象がすべてのすきま寸法において観察された。

4. 蒸気泡流動と局所沸騰熱伝達の関連性

前述のように狭い水平環状すきま内における蒸気泡の流動が3つの流動様相に分類できたことから、それぞれの流動特性と局所沸騰熱伝達との関連性を明らかにするため、次のような実験的研究を行った。以下に、実験装置および方法ならびに得られた結果と考察について述べる。

4.1 実験装置および方法

実験装置は3.1と同様である。また、蒸気泡の流動と局所沸騰熱伝達の関連性を明らかにする目的で製作した試験部を図7に示した。蒸気泡発生用銅製ヒータ⑥には外径6.3 mmのカートリッジヒータ⑦を装入させ、その伝熱面直径を3 mmとし、外径57.5 mmの伝熱管②の鉛直下方向表面に一致させるように、伝熱管軸方向中央に埋め込んだ。また、局所熱伝達測定用には、ステンレス箔ヒータ③(長さ910 mm, 厚さ30 μm , 幅10 mm)を用い、その中央部には直径3.5 mmの穴を設け、図中の拡大図に示すように蒸気泡発生用伝熱面を露出させ、伝熱面から蒸気泡を発生できるようにし、伝熱管にらせん状に巻き付け、接着した。局所熱伝達測定用伝熱面には直接電気加熱により伝熱面熱流束を与え、伝熱面表面温度測定のためステンレス箔ヒータの裏面に $\theta_T = \pm 10^\circ \sim \pm 170^\circ$ まで 20° 間隔に銅-コンスタンタン熱電対⑧を計18対取付けてある。ここで、局所熱

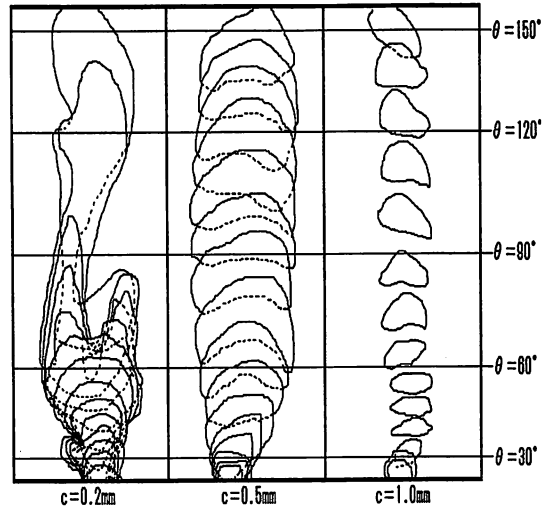


図4 蒸気泡成長過程 ($q_{cu} = 0.2 \times 10^6 \text{ W/m}^2$)

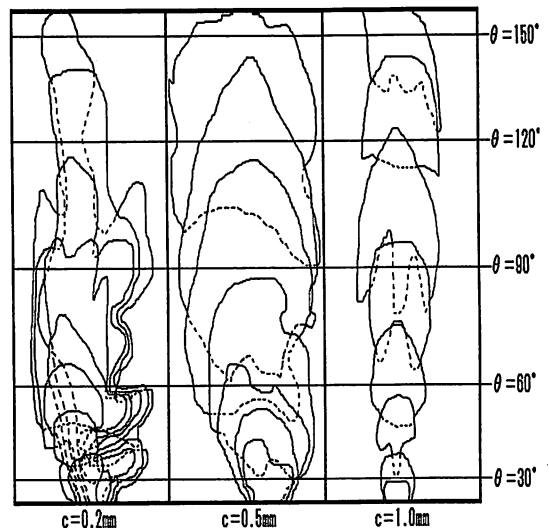


図5 蒸気泡成長過程 ($q_{cu} = 3.6 \times 10^6 \text{ W/m}^2$)

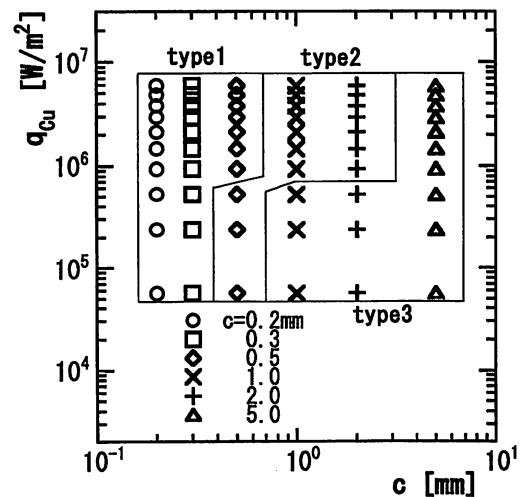


図6 蒸気泡流動様相

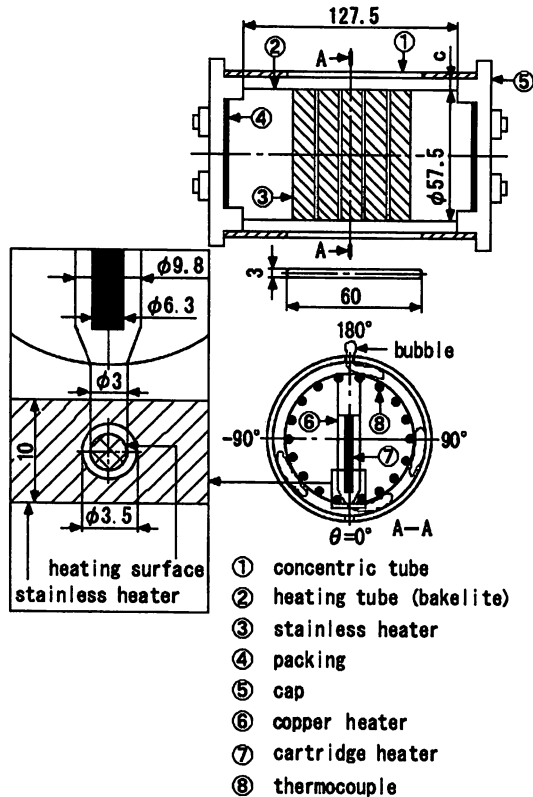


図7 局所沸騰熱伝達測定用試験部

伝達測定用ステンレス箔ヒータの伝熱面熱流束 q_{sus} は、 300 W/m^2 、 3000 W/m^2 の2種類とした。また蒸気泡発生用伝熱面熱流束 q_{cu} は、 $0.7 \times 10^6 \sim 4.3 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ の範囲としたが、3.1と同様、伝熱面以外への伝導による熱損失は考慮していない。なお、局所熱伝達測定に先立ち、 $q_{sus} = 0 \text{ W/m}^2$ の場合における蒸気泡流動観察を行い、その蒸気泡流動は3.2, 3.3の結果とほぼ一致していることを確認している。

実験は、干渉管①に上下に長さ60 mm、幅3 mmの開口部を設け、すきま寸法 c は、前述した3つの流動様相に分類された蒸気泡流動特性との関連で、 $c = 0.2, 0.5, 1.0 \text{ mm}$ の3種類とし、3.1と同一条件のもとで実験を行った。

4.2 すきま寸法による局所沸騰熱伝達特性

図8～11は、局所沸騰熱伝達特性について示したもので、縦軸に各位置における熱伝達率の無次元数である局所ヌセルト数 Nu_{θ_r} 、横軸に熱電対の取付け角度 θ_r 、パラメータにすきま寸法 c をとり示した。比較のために干渉管をつけない場合の結果についても示してある。なお蒸気泡発生用伝熱面から発生させた蒸気泡は、主に θ_r がプラスの方向に流動していることを肉眼で確認している。

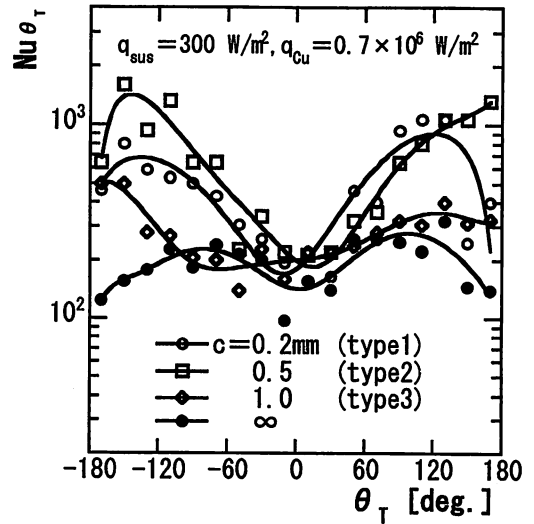


図8 各位置における Nu_{θ_r} 数の変化
($q_{sus} = 300 \text{ W/m}^2$, $q_{cu} = 0.7 \times 10^6 \text{ W/m}^2$)

図8は、 $q_{sus} = 300 \text{ W/m}^2$ 、 $q_{cu} = 0.7 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ (低熱流束域)の場合について示したものである。

流動様相1に分類される $c = 0.2 \text{ mm}$ の場合、伝熱管下部近傍 ($\theta_r = -10^\circ \sim +30^\circ$)の Nu_{θ_r} 数は、 $c = \infty$ の場合に比較し、若干の増加がみられる。この場合、伝熱管下部近傍でほとんどの蒸気泡が次々に合体し、下開口部近傍に充満する。その際、常に蒸気泡は流動しており、離脱するまでの時間は長くなるが、すきま内流入時に伝熱面近傍に形成されている過熱液層が刺激を受けるため、若干の増加を示しているものと考えられる。その後、すきま内に流入した蒸気泡は円周方向に成長しつつ伝熱管表面近傍の過熱液層をかく奪していくため、 Nu_{θ_r} 数は増大する。しかし円周方向に大きく成長した蒸気泡が上開口部から干渉管外に流出する際、上開口部近傍のすきま内にも蒸気泡が充満し、再びこの部分での流動が緩やかとなり、伝熱管上部近傍 ($\theta_r = \pm 170^\circ$)における Nu_{θ_r} 数は低下するものと考えられる。

流動様相2に分類される $c = 0.5 \text{ mm}$ の場合、 $-130^\circ \leq \theta_r \leq +130^\circ$ において、 $c = 0.2 \text{ mm}$ の場合とほぼ同様な分布形状であり、その伝熱特性にはさほど差異はないと考えられる。しかしながら、特に $\theta_r > +130^\circ$ では、 $c = 0.2 \text{ mm}$ の場合とは異なり伝熱管上部近傍でほとんどの蒸気泡は充満することなく上開口部より放出され、気液交換がスムーズに行われることから熱伝達が向上するものと考えられる。

流動様相3に分類される $c = 1.0 \text{ mm}$ の場合、 $-110^\circ \leq \theta_r \leq +110^\circ$ において、蒸気泡の成長がほ

狭い水平環状すきま内におかれた円管まわりの蒸気泡流動と局所熱伝達率について

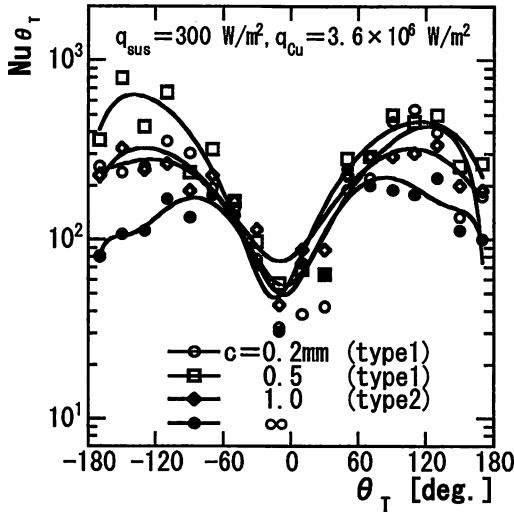


図9 各位置における Nu_{θ_T} 数の変化
($q_{sus} = 300 \text{ W/m}^2$, $q_{cu} = 3.6 \times 10^6 \text{ W/m}^2$)

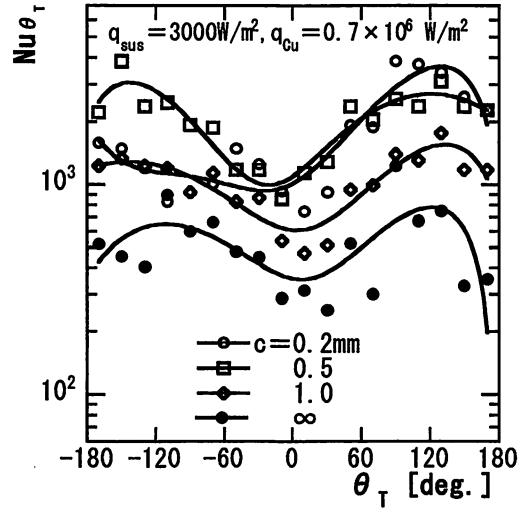


図10 各位置における Nu_{θ_T} 数の変化
($q_{sus} = 3000 \text{ W/m}^2$, $q_{cu} = 0.7 \times 10^6 \text{ W/m}^2$)

とんど無く、 $c = \infty$ の場合と同様の成長過程を示すため、 Nu_{θ_T} 数の分布も、ほぼ同様のものとなっている。しかし、 Nu_{θ_T} 数は、 $c = \infty$ の場合に比較して若干向上し、特に $\theta_T \geq \pm 110^\circ$ で顕著となっている。これは、蒸気泡により過熱液層がかく乱された効果と考えられる。なお、 $c = \infty$ の場合、蒸気泡が $\theta_T = \pm 90^\circ$ 近傍で伝熱管表面から離れ、伝熱管上部近傍の過熱液層はほとんど刺激を受けないことから、 Nu_{θ_T} 数は低下するものと推測される。

ここで、既報⁽⁸⁾に示してある蒸気泡体積の経時変化において、体積増加が緩やかとなっている部分では、蒸気泡流動も緩やかなため、 Nu_{θ_T} 数にさほど変化はみられないが、体積増加が顕著な部分では、過熱液層のかく乱効果が高まり、 Nu_{θ_T} 数が向上する。このように蒸気泡体積の経時変化と Nu_{θ_T} は、すきま寸法によらず、 q_{cu} が低熱流束域において密接な関係にあるものと考えられる。

図9は、 $q_{sus} = 300 \text{ W/m}^2$, $q_{cu} = 3.6 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ (高熱流束域)の場合について示したものである。 q_{cu} が高熱流束域になると前述の低熱流束域の場合に比較し、すべてのすきま寸法において伝熱管全周で Nu_{θ_T} 数が低下している。このことは、蒸気発生量増加に伴い、蒸気泡発生用伝熱面近傍で合体し、下開口部近傍に充満した蒸気泡がすきま内を流動する機会が多くなり、伝熱管表面のほとんどが蒸気泡で覆われるようになる。したがって、新鮮液体の流入が抑制され、伝熱管表面温度が上昇し、 Nu_{θ_T} 数が低下しているものと推測される。特に、伝熱管下部近傍 ($-10^\circ \leq \theta_T \leq +10^\circ$) の Nu_{θ_T} 数は、伝熱管下部近傍における蒸気泡がほぼ拘束状態となり、過熱液層

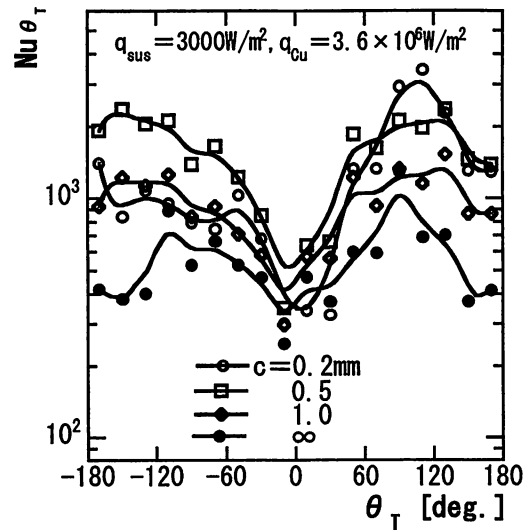


図11 各位置における Nu_{θ_T} 数の変化
($q_{sus} = 3000 \text{ W/m}^2$, $q_{cu} = 3.6 \times 10^6 \text{ W/m}^2$)

がほとんど刺激を受けないため、すべてのすきま寸法において $c = \infty$ とほぼ同様の値を示している。

なお、 $c = 0.2, 0.5 \text{ mm}$ における Nu_{θ_T} 数は、既報⁽⁸⁾に示してある蒸気泡体積の経時変化に依存しない変化を示しているものの、 $c = 1.0 \text{ mm}$ における Nu_{θ_T} 数は、 q_{cu} が低熱流束域の $c = 0.5 \text{ mm}$ の場合とほぼ同様の変化を示しており、蒸気泡体積の経時変化との関連性がみられる。

図10は、 $q_{sus} = 3000 \text{ W/m}^2$, $q_{cu} = 0.7 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ の場合について示してある。この場合、図6の場合と異なり、伝熱管下部近傍における Nu_{θ_T} 数は各すきま寸法で、 $c = \infty$ の場合に比較し大幅に増加

している。伝熱管下部近傍において最も大きい Nu_{θ} 数を示しているのは、 $c = 0.2, 0.5 \text{ mm}$ の場合で、 $c = \infty$ の約2.5倍の値を示している。 $c = 1.0 \text{ mm}$ の場合は、 $c = \infty$ の約1.5倍の値を示している。また、すべてのすきま寸法において、 $q_{\text{sus}} = 300 \text{ W/m}^2$ の場合に比較し、伝熱管全周で Nu_{θ} 数が向上している。特に、すきまが寸法が狭い、 $c = 0.2, 0.5 \text{ mm}$ の場合が伝熱管全周で最も大きい値を示している。したがって、ステンレス箔ヒータからの蒸気泡量が増加し、蒸気泡発生用伝熱面より発生する蒸気泡の影響が小さくなると、特にすきま寸法が狭い場合において伝熱促進が顕著なことが明らかとなった。しかし、詳細な機構は不明であり、その説明は、今後の課題である。

図11は、 $q_{\text{sus}} = 3000 \text{ W/m}^2$ 、 $q_{\text{cu}} = 3.6 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ の場合について示してある。この場合、伝熱管下部近傍における Nu_{θ} 数は、すべてのすきま寸法においてほぼ同様の値を示している。このことから、蒸気泡発生用伝熱面からの蒸気泡量が増加すれば、ステンレス箔ヒータの大小に関わらず、伝熱管下部近傍に常に蒸気泡が充満している状態となり、熱伝達の促進は望まれないことが明らかとなった。

4.3 蒸気泡量の変化と平均熱伝達特性

これまで、局所熱伝達率の変化を蒸気泡流動との関連で考察してきたが、熱交換器の設計においては緒言で述べたように、平均熱伝達率で評価されている。このことから、ここでは、試みとして平均熱伝達率を算出し、発生蒸気泡量の変化との関連で検討を行った。

図12は、 $q_{\text{sus}} = 300 \text{ W/m}^2$ における発生蒸気泡量の変化に伴う平均熱伝達率の分布を示しており、縦軸に平均熱伝達率の無次元数である平均ヌセルト数 Num 、横軸に発生蒸気泡量の変化量として q_{cu} 、パラメータにすきま寸法 c をとっている。

$c = 0.5 \text{ mm}$ の場合、 Num 数は、 $q_{\text{cu}} \leq 1.0 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ では、伝熱面からの発生蒸気泡量が少なく、蒸気泡流動が平均熱伝達率に与える影響は、 $q_{\text{cu}} = 0 \text{ W/m}^2$ の場合とさほど変わらないことから、ほぼ一定に推移する。 $q_{\text{cu}} > 1.0 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ になると発生蒸気泡量が増え、 q_{cu} の増大に伴い新鮮液体の流入が抑制され、 Num 数は徐々に低下する。特に $q_{\text{cu}} = 4.0 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ における Num 数は、 $q_{\text{cu}} \leq 1.0 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ の約30%の値であり、蒸気泡流入による伝熱の劣化が生じている。

$c = 0.2 \text{ mm}$ の場合は、 $c = 0.5 \text{ mm}$ の場合とほぼ

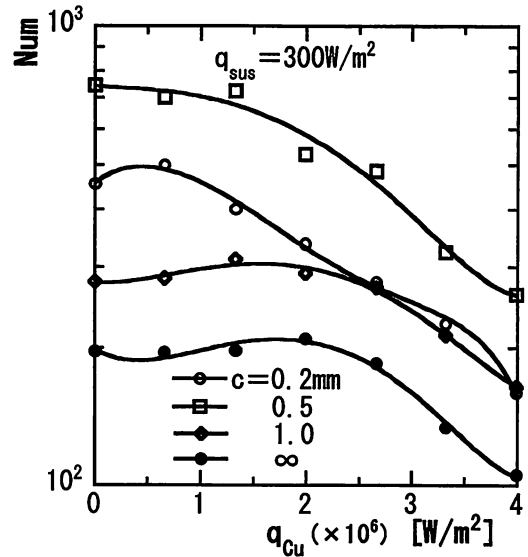


図12 q_{cu} の変化に伴う Num 数の分布 ($q_{\text{sus}} = 300 \text{ W/m}^2$)

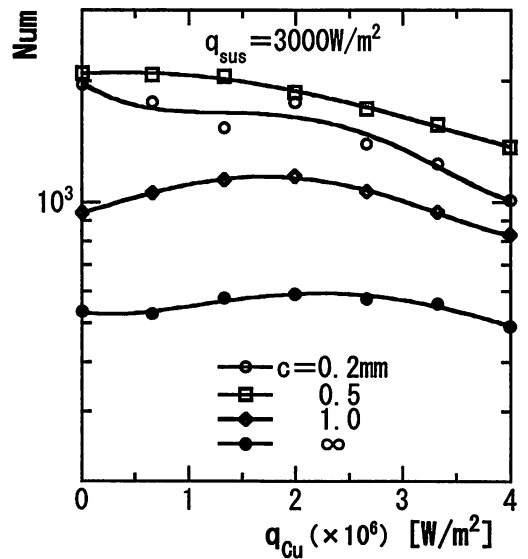


図13 q_{cu} の変化に伴う Num 数の分布 ($q_{\text{sus}} = 3000 \text{ W/m}^2$)

同様の分布傾向を示しているが、全体的に Num 数は低下している。このことは、 q_{cu} の増加に伴い、 $c = 0.5 \text{ mm}$ の場合に比較し、すきま内は断続的な液体不足の状態になり、伝熱面温度が上昇するためであると推測される。

$c = 1.0 \text{ mm}$ および ∞ では、 $q_{\text{cu}} \leq 2.0 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ では、銅製ヒータからの蒸気泡による影響はほとんどみられず、 Num 数がほぼ一定に推移するが、 $q_{\text{cu}} > 2.0 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ では減少する。

これらのことから、伝熱管下部より発生させた蒸

狭い水平環状すきま内におかれた円管まわりの蒸気泡流動と局所熱伝達率について

気泡量の増加に伴い、伝熱促進が阻害されることが明らかとなった。

図13は、 $q_{\text{sus}} = 3000 \text{ W/m}^2$ の場合について示したものである。この場合、 $c = 0.2, 0.5 \text{ mm}$ では q_{cu} の増大に伴い、Num は減少するものの、 $q_{\text{sus}} = 300 \text{ W/m}^2$ の場合に比較すると減少割合は小さい。また、 $c = 1.0 \text{ mm}, \infty$ では、ほぼ一定に推移している。このことは、ステンレス箔ヒータから発生する蒸気泡の影響で、上部および下部開口部近傍に蒸気泡がさほど充満せず、気液交換がスムーズに行われているためであると予想されるが、詳細な機構は不明であり、今後の研究課題である。

5. 結 言

本研究では、上下に細長い開口部を有する狭い水平環状すきま内におかれた円管まわりの沸騰熱伝達について、環状すきま寸法 c を $0.2 \sim 5.0 \text{ mm}$ まで変化させ、伝熱管下部より発生させた蒸気泡のすきま内における流動特性を明らかにするとともに、蒸気泡の流動が局所熱伝達率におよぼす影響について、被加熱流体に R11 を使用し、蒸気泡発生用伝熱面熱流束 q_{cu} を $0.1 \times 10^6 \sim 5.9 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ の範囲で実験的研究を行った。本実験範囲で得られたおもな結果を以下に示す。

- (1) 狭い水平環状すきま内における蒸気泡の流動特性は、次の3つの流動様相に分類することができた。すなわち、流動様相1として、蒸気泡が狭いすきま内を円周方向に大きく成長した後、伝熱面から離脱する場合。次に、流動様相2として、蒸気泡は流動様相1の場合ほど円周方向には成長せずに伝熱面から離脱し、その後蒸気泡の成長がみられない場合。そして、流動様相3として、干渉管のない場合とほぼ同様、蒸気泡の成長がほとんどみられない場合。以上のように分類される。
- (2) $q_{\text{sus}} = 300 \text{ W/m}^2$ 、 q_{cu} が発生蒸気泡量の少ない低熱流束域の場合、いずれのすきま寸法においても伝熱管下部近傍の局所ヌセルト数は、干渉管のない場合に比較し若干の向上がみられる。また、環状すきま内を蒸気泡が流動する場合、局所ヌセルト数は蒸気泡体積の経時変化に追従するような分布を示す。

す。

(3) $q_{\text{sus}} = 300 \text{ W/m}^2$ 、 q_{cu} が発生蒸気泡量の多い高熱流束域の場合、すきま寸法によらず、伝熱管下部近傍における局所ヌセルト数は、干渉管がない場合とほぼ同様の値を示す。また、いずれのすきま寸法においても低熱流束域と同様に流動様相1あるいは2のごとく蒸気泡はすきま内を流動するものの、局所ヌセルト数は低熱流束域の場合に比較して、伝熱管全周で低下する。

(4) 平均ヌセルト数は、 $q_{\text{sus}} = 300 \text{ W/m}^2$ の場合、環状すきまが 0.2 mm および 0.5 mm においては $q_{\text{cu}} \leq 1.0 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ の場合、 1.0 mm においては $q_{\text{cu}} \leq 2.0 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ の場合、それぞれ q_{cu} によらずほぼ一定に推移するが、 q_{cu} がそれ以上増加し、狭い水平環状すきま内を流動する蒸気泡量が増加すると、伝熱管の平均ヌセルト数は減少する。

以上のことから、本モデルにおける伝熱促進を考慮する場合、伝熱管上部および下部の熱伝達促進が必要であることが明らかとなった。このことより、伝熱管上部および下部の熱伝達促進のため、開口部の形状を検討することが必要不可欠で、よりスムーズな気液交換が実現できる開口部形状を見出すことが今後の研究課題である。

6. 参考文献

- (1) 例えば、石橋・西川、日本機械学会論文集、33-245 (1967), 121.
- (2) S. Aoki・ほか3名、*Int. J. Heat Mass Transf.*, 26-7 (1982), 985.
- (3) 島田・ほか4名、日本機械学会論文集 (B編), 55-515 (1989), 2035.
- (4) Hung, Y.H. and Yao, S.C., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 107-3 (1985), 656.
- (5) 石橋・岩崎、日本冷凍協会誌, 57-654 (1982), 333.
- (6) 土田・相場、日本機械学会論文集 (B編), 56-568 (1993-12), 3899~3905.
- (7) 田中・土田、秋田高専研究紀要, 34 (1999-2), 9~16.
- (8) 今野 学位授与機構論文 (2001-10).