

上下に開口部を有する干渉管を付属させた 円管の局所沸騰熱伝達について

田 中 健太郎*・土 田 一

Local Heat Transfer in Boiling from Horizontal Tube Enclosed by Concentric Outer Tube

Kentaro TANAKA* and Hajime TSUCHIDA

(1998年11月30日受理)

An experimental investigation of boiling heat transfer of saturated R11h has been conducted with a horizontal cylinder which is 50 mm in diameter and 100 mm in length, and is enclosed by concentric outer tubes. These outer tubes have two holes which are 3 mm in width and 60 mm long. The clearance (c) between these tubes ranged from 0.35 mm to ∞ and heat flux (q) from 300 to 3.5×10^4 W/m². Local heat transfer characteristic are demonstrated and discussed in this report.

1. 緒 言

近年、熱エネルギーの有効利用が重要視され、相変化を伴う熱交換器の高性能化及びコンパクト化を狙い、高性能伝熱管の研究開発が行われている⁽¹⁾。

他方、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に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^{(2),(3)}あるいは水平伝熱面⁽⁴⁾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。一方、狭い空間内におかれた水平円管の沸騰熱伝達に関する報告が Hung⁽⁵⁾、石橋⁽⁶⁾、土田ら⁽⁷⁾にみられる。

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(薄液膜蒸発機構)^{(2)~(6)}と、蒸気泡による伝熱面近傍の過熱液の強制はく奪(気液交換機構)⁽⁷⁾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。しかしながら、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

価されており、沸騰現象においては伝熱面から蒸気泡が発生することから沸騰空間内で対流が起こり、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、管胴型蒸発器の性能向上に関し伝熱管の局所的な熱伝達の制御という観点から水平円管の伝熱系を取り上げ、上下に細長い開口部を有する水平環状すきま内におかれた水平円管の局所沸騰熱伝達特性について実験的に明らかにしようとする基礎的研究である。

2. 主な使用記号

c : 伝熱管と干渉管内面とのすきま [m]

d : 供試伝熱管直径 [m]

d' : 外側円管の内径 [m]

E : 電圧 [V]

I : 電流 [A]

L : 有効伝熱部長さ [m]

Nu_{θ} : ヌセルト数 $= \alpha \cdot d / \lambda$

Q : 供給熱量 $= E \cdot I$ [W]

q : 伝熱面熱流束 $= Q / (\pi \cdot d \cdot L)$ [W/m²]

T_s : 被加熱流体の飽和温度 [K]

* 秋田高専専攻科学生

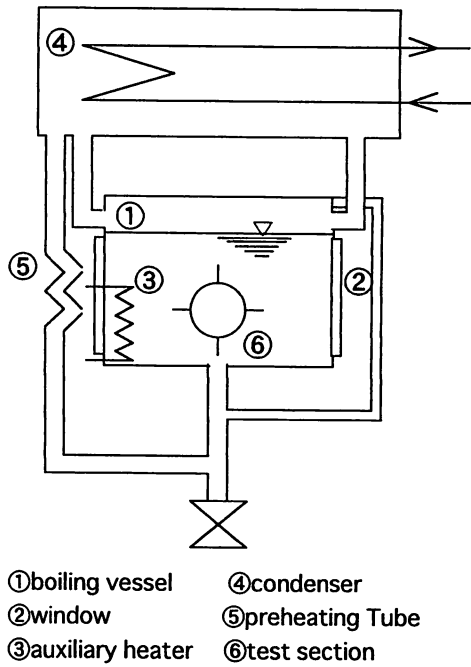


図1 実験装置概略

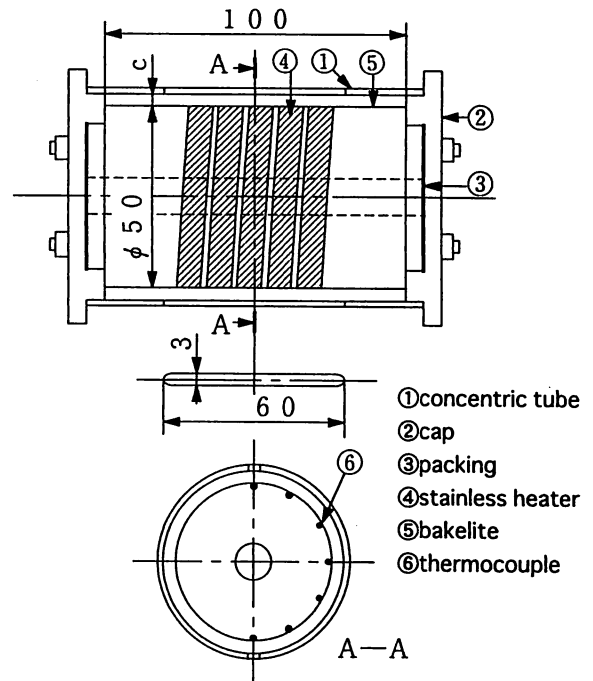


図2 試験部概略

T_w : 伝熱管表面温度 [K]

α : 局所熱伝達率

$$= q / \Delta T_{sat} [W / (m^2 \cdot K)]$$

ΔT_{sat} : 過熱度 = $T_w - T_s$ [K]

θ : 試験部下方 (6時方向) を基点として
取り付け熱電対の位置 [deg.]

λ : 液体の熱伝導率 [W / (m · K)]

3. 実験装置及び実験方法

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。伝熱管はフランジに片持ちで固定され、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、伝熱管の下方に被加熱流体温度測定のため銅-コンスタンタン熱電対が取り付けられている。図2に本実験に使用した試験部の詳細を示す。外径50 mmのベークライト製の丸棒にヒータとして厚さ30 μ m、幅10 mm、長さ805 mmのステンレス箔をらせん状に貼り付け、直接電気加熱により伝熱面に熱流束(熱流束一定)を与えた。また、伝熱面表面温度測定のため、ヒータの裏面に真下を0°とし、周方向に30°、60°、90°、120°、150°、180°の位置に銅-コンスタンタン熱電対を取り付けた。試験部はすきま寸法cが0.35、0.50、0.75、1.00、2.00 mmとなる内径のアルミニウム製の円管(以後干涉

管と呼称)で伝熱面を同心状に覆い沸騰空間を形成するようにし、図1に示したように沸騰容器底部より80 mm上方の位置に設置した。図2に図示してあるように、干涉管には上下に長さ60 mm、幅3 mmの開口部を設けた。幅3 mmの開口部については種々の予備実験の結果伝熱促進が最も顕著な寸法で、本報ではこの開口部の幅は一定とした。実験は、試験流体にフロン系冷媒R11を使用し、伝熱面熱流束qは約300~35000 W/m²の範囲で大気圧下、飽和沸騰のもとで行った。また、狭い空間内の沸騰熱伝達特性を沸騰様相との関連で検討するため、干涉管にアクリル管を使用し可視化実験も行った。なお、

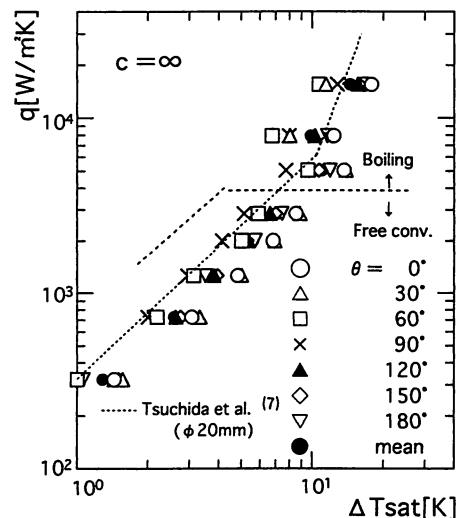


図3 沸騰曲線 (c = ∞)

すきま c に関する製作誤差は ± 0.05 mm である。

4. 実験結果及び考察

4.1 供試伝熱管の沸騰曲線

図3は、狭い空間内での沸騰熱伝達の実験に先立ち、干渉管のない場合すなわち $c = \infty$ の場合のプール飽和沸騰の実験を行った結果である。横軸に伝熱面温度と流体の飽和温度との差、すなわち過熱度 ΔT_{sat} 、縦軸に伝熱面熱流束 q をとり、各熱電対取り付け位置 θ で得られた沸騰曲線を示した図である。なお、●印は円管全体の平均値を示している。 $q \leq 3000$ W/m²では熱電対の位置 θ がいずれの場合も q の増加に比例して ΔT_{sat} も増加する。この場合、伝熱面より発生する蒸気泡はごくわずかで大きさも小さく、自然対流的な流動状況となっている。また、 $q \geq 4000$ W/m²においては核沸騰域に達し、伝熱面上からの発生蒸気泡も増加し、 $q \leq 3000$ W/m²の場合と異なり q の増加に対する ΔT_{sat} の増加割合が小さくなっている。なお、図中の破線は土田ら⁽⁷⁾が直径20 mmの伝熱管を用い、間接電気加熱により得られた結果である。土田らの結果と比較し、定性的・定量的にもほぼ一致している。

4.2 干渉管を付属させた場合の沸騰曲線

図4は、伝熱管と干渉管内面とで構成される環状すきま寸法 c (以後すきま寸法と呼称) が0.35 mmの場合の沸騰曲線である。 $\theta = 0^\circ$ の場合、 $q \leq 6000$ W/m²で q の増加に伴い ΔT_{sat} も単調に増加するが、 $q \geq 6000$ W/m²では q に対する ΔT_{sat} の増加割合が大きくなっている。 $\theta = 30^\circ$ 及び 60° の場合、沸騰曲線はそれぞれほぼ同様な傾向を示しており、 q の増加に伴う ΔT_{sat} の増加が他の θ に比較して小さくなっている。特に $q \approx 2000 \sim 8000$ W/m²では ΔT_{sat} の増加がほとんどみられない。 $\theta \geq 90^\circ$ の場合、 $q \leq 2000$ W/m²では q の増加に対する ΔT_{sat} の増加割合は小さく、 $q \geq 2000$ W/m²では ΔT_{sat} の増加割合が大きくなっている。また、 $q \leq 4000$ W/m²では各熱電対の位置により同一熱流束時の ΔT_{sat} にかなりの差異がみられるが、 $q \geq 4000$ W/m²においては ΔT_{sat} にさほど差異はみられない。なお、 $\theta \leq 60^\circ$ 及び円管内全体の平均値の沸騰曲線は土田ら⁽⁷⁾の $c = 0.35$ mmの場合と同様な傾向を示している。

図5は、すきま寸法 c が0.50 mmの場合の沸騰曲線を示したものである。いずれの θ においての $q =$

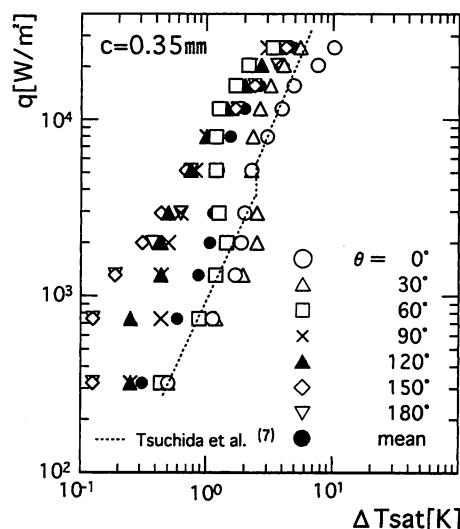


図4 沸騰曲線 ($c = 0.35$ mm)

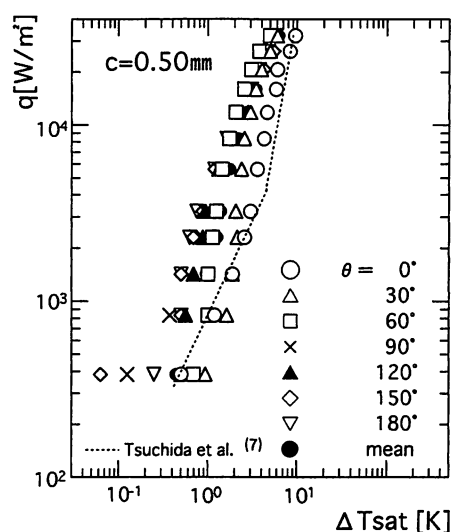


図5 沸騰曲線 ($c = 0.50$ mm)

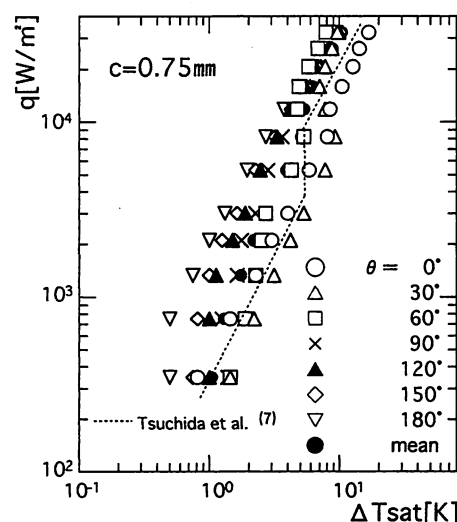


図6 沸騰曲線 ($c = 0.75$ mm)

700~4000 W/m²の比較的小さい熱流束域でqの増加に伴うΔT_{sat}の増加が小さくなっていて、図中に示した土田ら⁽⁷⁾の結果よりも低い伝熱面熱流束域となっている。q ≥ 4000 W/m²では q ≤ 4000 W/m²の場合に比較し q の増加の対する ΔT_{sat} の増加割合がいくぶん大きなものとなっている。なお、q ≤ 4000 W/m²に比較し c = 0.35 mm の場合と同様同一熱流束時における ΔT_{sat} の θ による差異が小さくなっている。

図6は c = 0.75 mm の場合の沸騰曲線を示したものである。c < 0.50 mm の場合と同様に同一熱流束時の ΔT_{sat} の θ による差異が生じているが、その差異が生ずる伝熱面熱流束が約10000 W/m²近傍の高い領域に存在している。また、θ ≤ 60°において q ≈ 5000~16000 W/m²でqの増加に伴う ΔT_{sat} の増加がほとんどみられず、この場合も c ≤ 0.50 mm の場合と異なり比較的高い伝熱面熱流束域に存在している。なお、θ ≤ 60°では土田らの結果とほぼ同様な傾向を示しているものの、θ ≥ 60°では q の増加に対し、ΔT_{sat} は単調に増加している。

図7はすきま寸法 c が2.00 mm の場合の沸騰曲線について示したものである。この沸騰曲線において、相対的には c = ∞ の結果とほぼ類似した沸騰特性を示している。しかし、q ≥ 10000 W/m²では θ = 180°の場合を除いてほとんどの θ で同一熱流束時の ΔT_{sat} が c = ∞あるいはすきま寸法は若干異なるが、土田らの結果に比較して高くなっている。

4. 3 局所沸騰熱伝達の挙動

4. 3. 1 干渉管のない場合の局所沸騰熱伝達

図8は、干渉管のない場合、すなわち c = ∞ の場合の各熱電対の位置 θ による局所ヌセルト数 Nu_θ の変化を伝熱面熱流束 q をパラメータにとり示した図である。q ≤ 4000 W/m²の比較的低熱流束域の小さい領域では、θ が約30°近傍までほぼ一定であるが、角度の増加に伴い Nu_θ 数も増加し、θ が約90°近傍で最大値を示している。この場合、この伝熱面熱流束域では θ = 0°近傍からの蒸気泡の発生がごくわずかで、その大きさも小さくその気泡群が伝熱面近傍に存在する過熱液層をかく乱しながら上昇するために熱伝達が向上していると考えられる。しかし、θ ≥ 90°では気泡群は伝熱面より離脱してしまうことから Nu_θ 数も徐々に減少している。一方、q ≥ 4000 W/m²では、十分な核沸騰域となっていることから伝熱面全体より蒸気泡が発生する。特に θ が 0°近傍で発生した蒸気泡は θ = 60°近傍まで成長

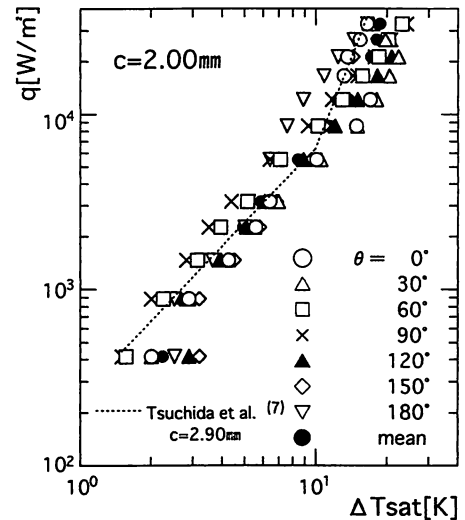


図7 沸騰曲線 (c = 2.00 mm)

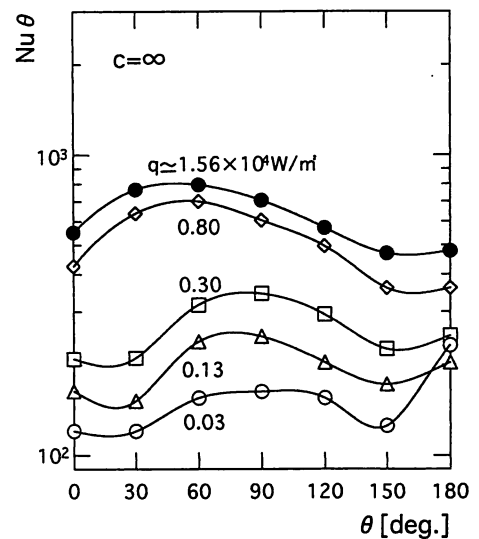


図8 各位置における Nu_θ 数の変化 (c = ∞)

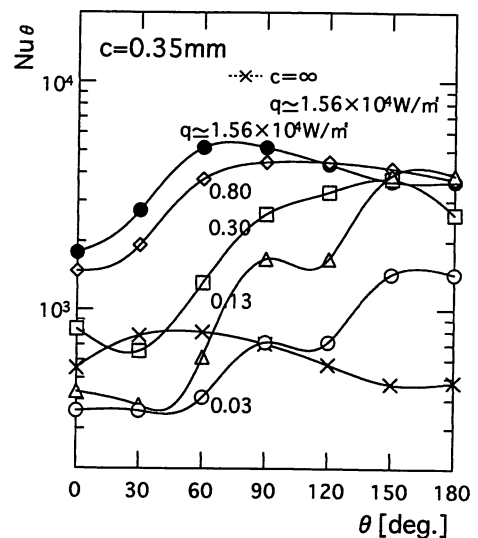


図9 各位置における Nu_θ 数の変化 (c = 0.35 mm)

上下に開口部を有する干渉管を付属させた円管の局所沸騰熱伝達について

しながら伝熱面に沿って浮上，この時，伝熱面近傍に形成されている過熱液層をもはく奪していくことから熱伝達が向上すると考えられる。しかしながら， $\theta = 60^\circ$ では成長した蒸気泡が伝熱面より離脱することから Nu_θ 数も θ の増加とともに減少する。

4. 3. 2 干渉管を付属させた場合の局所沸騰熱伝達

図9～図12はそれぞれのすきま寸法における各熱電対の位置 θ による局所ヌセルト数 Nu_θ の変化を伝熱面熱流束 q をパラメータにとり示した図である。図9は $c = 0.35$ mm の場合について示したものである。 $q \leq 3000$ W/m²では $\theta = 30^\circ$ 近傍まで Nu_θ 数はほぼ一定に推移するが，その後 θ の増大に伴い局所熱伝達率が大きくなっている。これは，すきま内の下方より発生した蒸気泡が $\theta = 30^\circ$ 近傍までは差ほど成長することがなく，その流動はゆるやかとなっている。その後 θ が大きくなるにしたがい蒸気泡は互いに合体したりしながらすきま内を押し広げられるように浮上し，その浮上速度も加速される。同時に伝熱面近傍に形成されている過熱液層をはく奪することにより熱伝達が促進されると考えられる。 $q \geq 3000$ W/m²においては， $\theta = 60^\circ$ 近傍までは θ の増加に伴い Nu_θ 数も増加するが， $\theta \geq 60^\circ$ では沸騰空間が狭いため q の増加に伴いすきま内上部は蒸気によって覆われるようになる。このために，円管上部近傍では周囲液体の流入が蒸気泡によって妨げられはじめていることにより，局所熱伝達率が若干の低下として現われるものと考えられる。なお，伝熱面熱流束が約15600 W/m²において，干渉管のない ($c = \infty$) 場合に比較し，最大で約6～8倍程度熱伝達が促進されている。

$c = 0.50$ mm (図10) の場合， $c = 0.35$ mm の場合とほぼ同様な伝熱特性を示しており，その沸騰挙動も類似したものになっていると考えられる。しかし，定量的には若干の相違がみられ，特に $q \leq 3000$ W/m²において $c = 0.35$ mm の場合と比較して $\theta \geq 90^\circ$ の伝熱管上部近傍での伝熱促進率が低下している。このことは沸騰空間がやや広くなることで空間内を浮上する蒸気泡が干渉管内面に沿って上昇することから伝熱面近傍に形成されている過熱液層をはく奪する機構が $c = 0.35$ mm の場合と比較してやや劣るためと考えられる。

$c = 0.75$ mm (図11) の場合，さらに沸騰空間が広がることから前述の $c = 0.35, 0.50$ mm の場合と比較し伝熱特性には大きな変化はさほどないもの

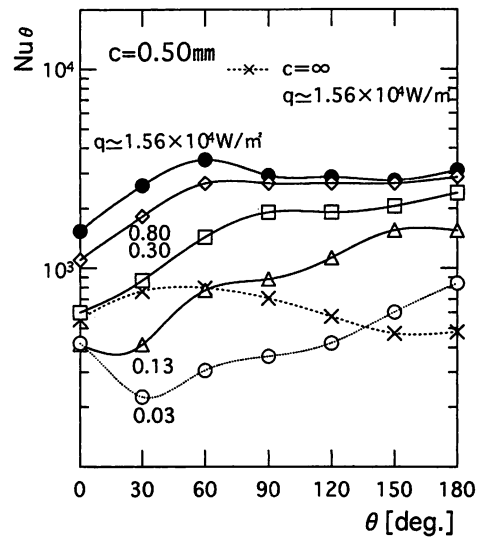


図10 各位置における Nu_θ 数の変化 ($c = 0.50$ mm)

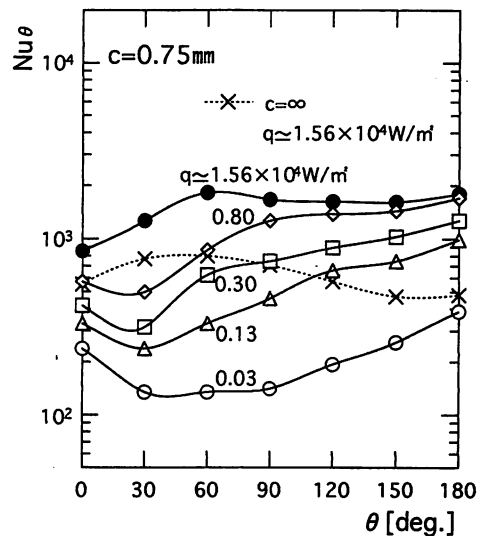


図11 各位置における Nu_θ 数の変化 ($c = 0.75$ mm)

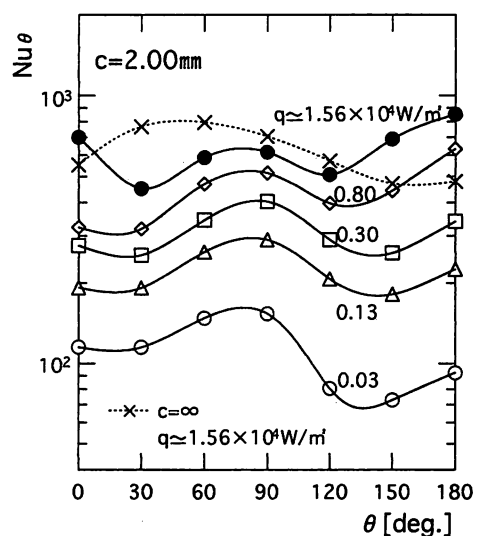


図12 各位置における Nu_θ 数の変化 ($c = 2.00$ mm)

の伝熱促進率が低下している。特に $q \approx 3000 \sim 8000$ W/m^2 の中熱流束域において $\theta = 30^\circ \sim 60^\circ$ 近傍での熱伝達の低下が顕著となっている。この場合、 $\theta = 0^\circ$ 近傍より発生した蒸気泡は $\theta = 30^\circ$ 近傍まではさほど大きく成長せずに浮上するため、その後は徐々に成長しながら空間内を上昇し局所熱伝達率もわずかながら大きくなるものと考えられる。

$c = 2.00$ mm (図12) とさらに空間が広がると、いずれの伝熱面熱流束においても $\theta = 30^\circ$ 近傍までは Nu_θ 数はほぼ一定に推移している。 $\theta \geq 30^\circ$ では θ の増加に伴い Nu_θ 数は若干増加するものの、その後 Nu 数は $\theta = 140^\circ$ 近傍で熱伝達の低下がみられる。このことは、 $\theta = 0^\circ$ 近傍より発生した蒸気泡は $\theta = 30^\circ$ 近傍までは成長せずに浮上するがその後 $\theta = 90^\circ$ 近傍までは若干の成長をみせながら伝熱面に沿って浮上するために Nu_θ 数はわずかながら増加する。この場合、沸騰空間のきわめて狭い場合とは異なり、伝熱面近傍の過熱液層をはく奪するまでは至らず、かく乱により局所熱伝達率が若干向上すると考えられる。 $\theta = 90^\circ$ 近傍以上では蒸気泡は伝熱面から離れ干渉管内面に沿って浮上するために過熱液層に対するかく乱も弱まり Nu_θ 数は減少する。また、伝熱管上部すなわち上開口部近傍では蒸気泡が互いに合体し大きめな蒸気泡となるため、伝熱面表面に形成されている過熱液層と接触する機会が多くなることから、 Nu_θ 数は若干増加するものと考えられる。なお、 $c = 2.00$ mm の場合、いずれの伝熱面熱流束においても干渉管のない場合と比較し局所熱伝達特性は異なるものの平均熱伝達率はほぼ一致した結果となっている。

4. 4 局所沸騰熱伝達の挙動とすきま寸法

図13, 図14は伝熱面熱流束ごとの各熱電対の位置 θ による局所ヌセルト数 Nu_θ の変化をすきま寸法 c をパラメータに示したものである。なお、縦軸にはすきま寸法の影響を考慮し、 Nu_θ 数を干渉管内径 d' と伝熱管直径 d の比で割った値をとっている。

$q \approx 2200$ W/m^2 (図13) の低熱流束域において、 $c \geq 0.75$ mm, $\theta \leq 90^\circ$ では沸騰空間形状、すなわちすきま寸法による大きな差異はみられないが、 $\theta \geq 90^\circ$ でその影響が現われる。このことは沸騰様相から $c \geq 2.00$ mm の場合、 $\theta \leq 90^\circ$ では発生蒸気泡が伝熱面に沿うように浮上するのに対して、 $\theta \geq 90^\circ$ では逆に干渉管内面に沿って浮上する。 $c = 1.00 \sim 0.75$ mm の場合、 $\theta \geq 90^\circ$ においても蒸気泡は伝熱面に対して接するような流動状況となっていて伝熱面近傍の過熱液層をかく乱することで比較的熱伝達が向上するものと考えられる。 $c \leq 0.50$ mm の場合、 $\theta \leq 60^\circ$ 近傍まで Nu_θ 数はほぼ一定の値を示し、その後緩やかに増加する。これは、発生蒸気泡は小さいがすきまが狭いために伝熱面上を通過し、 $\theta \geq 60^\circ$ では蒸気泡は押広げられるように浮上するにしたがいすきま内で成長し、その浮上速度も伝熱面熱流束の増加とともに加速されるために局所熱伝達率が向上するものと考えられる。

$q \approx 15600$ W/m^2 (図14) の中熱流束域から高熱流束域において、 $c \geq 2.00$ mm では前述の低熱流束域の場合と同様局所熱伝達率の分布にほとんど差異は認められない。また、 $c \leq 1.00$ mm の場合、いずれのすきま寸法においても定量的には差異はあるものの局所熱伝達の分布形状に変化はみられない。すな

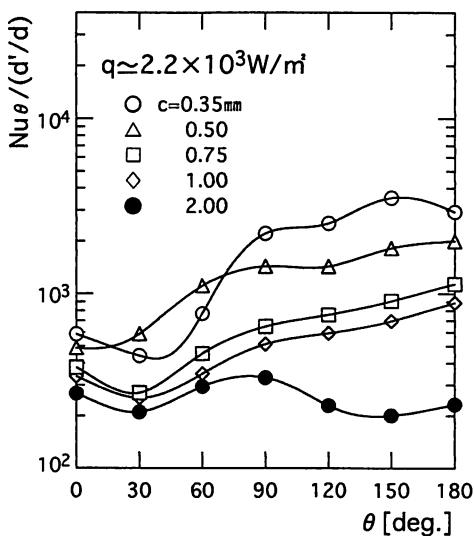


図13 各位置における Nu_θ 数の変化 ($q \approx 2200$ W/m^2)

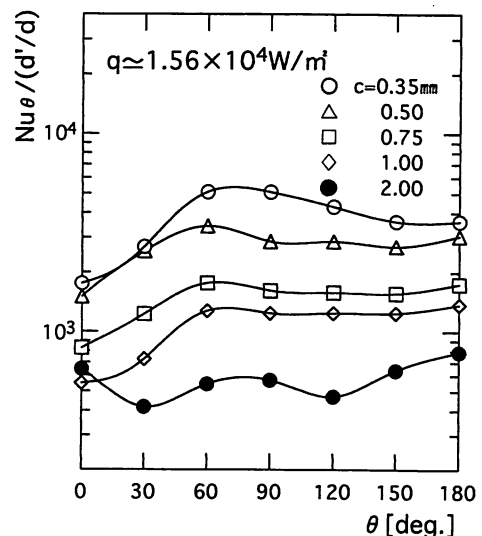


図14 各位置における Nu_θ 数の変化 ($q \approx 15600$ W/m^2)

上下に開口部を有する干渉管を付属させた円管の局所沸騰熱伝達について

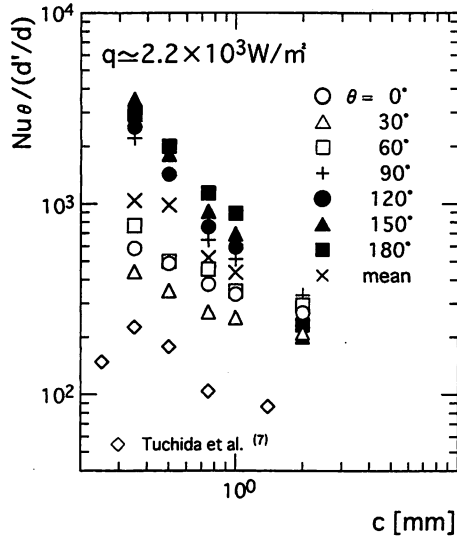


図15 すきま寸法による Nu_{θ} 数の変化 ($q \approx 2200 \text{ W/m}^2$)

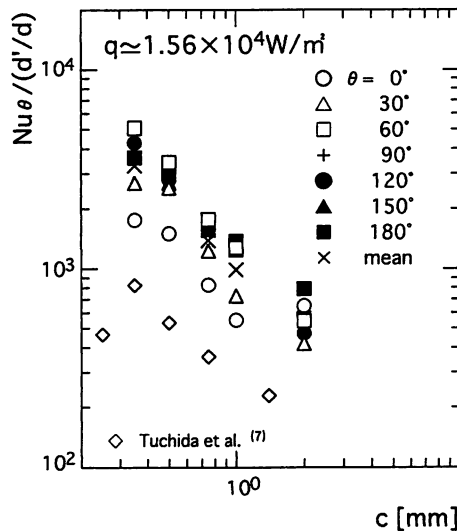


図16 すきま寸法による Nu_{θ} 数の変化 ($q \approx 15600 \text{ W/m}^2$)

わち、 $\theta \leq 90^\circ$ では θ の増大に伴い局所熱伝達率も増加するが、 $\theta \geq 90^\circ$ においては局所熱伝達率はほぼ一定となりほとんど変化はみられない。したがって、中・高熱流束域と低熱流束域では局所沸騰熱伝達率の分布形状に差異が生ずることが判明した。

4. 5 すきま寸法の減少に伴う局所沸騰熱伝達の推移

図15は低熱流束域 $q \approx 2200 \text{ W/m}^2$ の場合のすきま寸法 c による局所ヌセルト数 Nu_{θ} の変化を各熱電対の位置 θ をパラメータに示したものである。いずれの θ においてもすきま寸法の減少に伴い熱伝達も増加している。伝熱管上部では $c = \infty$ ，すなわち干渉管のない場合に比較し最大で約10倍の伝熱促

進が得られている。このことは、伝熱管上部での蒸気泡の流動が活発であることを示している。そして、伝熱管下部近傍の伝熱促進が約3倍程度とそれほどなされていない。この傾向は図16に示す本実験における高熱流束域 $q \approx 15600 \text{ W/m}^2$ の場合についても同様なものとなっている。しかし、高熱流束域では低熱流束域ほど局所的な差は少なく、 $c = \infty$ に比較し伝熱促進が最大で約5倍程度となっている。

なお、土田らが直径20 mmの伝熱管を用いて間接電気加熱で行った結果を図中に示したが定量的には異なるものすきま寸法の減少に伴う局所沸騰熱伝達特性はほぼ同一な傾向となっている。

以上、本実験のモデルでは伝熱面熱流束により伝熱管上部と下部では熱伝達率にかなりの差異が認められた。したがって本モデルを考えた場合、特に伝熱管下部近傍の熱伝達を促進させることが不可欠で、下開口部の位置及び形状について検討が必要とされるものと考えられる。

5. 結 言

狭い沸騰空間内に置かれた水平円管の局所沸騰熱伝達に関し、上下に円管軸と平行な2本の幅3 mmの開口部を有する円筒内に直径50 mmの伝熱管を同心状に設置し、発生気泡の抜け及び液体の流入が円周方向になるように考慮し、両者で構成される環状すきまを2.00 mmまで変化させた場合について、被加熱流体にフロン系冷媒 R11 を使用し、実験的研究を行った。本実験範囲で得られた主な結果を以下に示す。

(1) 環状すきまが2.00 mm以上では、沸騰曲線は干渉管がない場合及び土田ら⁽⁷⁾が $\phi 20 \text{ mm}$ の伝熱管を用い間接電気加熱によって得られた結果とほぼ同様の傾向を示す。しかし、環状すきまが1.00 mm以下ではそれぞれのすきま寸法において土田らの結果及び干渉管のない場合と比較し、定性的かつ定量的に異なる。

(2) 環状すきまが1.00 mm以下の場合、本実験における低熱流束域において、特に各熱電対の位置 θ が60°近傍から上方では、 θ の増大に伴い局所熱伝達率も向上するが、中・高熱流束域では θ が90°近傍より上方で局所熱伝達率は θ によらずほぼ一定に推移する。

(3) いずれの熱電対の位置 θ において、伝熱面熱流束によらずすきま寸法の減少に伴い局所熱伝達率は増加し、土田らの結果とほぼ同一なものとなる。

(4) 本モデルを考えた場合、特に伝熱管下部近傍の熱伝達を促進させることが不可欠で、下開口部の位置及び形状について検討が必要とされるものと考えられる。

6 参考文献

- (1) 熱交換技術入門, 中山 恒, オーム社
- (2) 例えば, 石橋・西川, 日本機械学会論文集, 33-245 (1967), 121.
- (3) S.Aoki・ほか 3 名, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 26-7 (1982), 985.
- (4) 島田・ほか 4 名, 日本機械学会論文集 (B 編), 55-515 (1989), 2035.
- (5) Hung, Y.H. and Yao, S.C., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 107-3 (1985), 656.
- (6) 石橋・岩崎, 日本冷凍協会誌, 57-654 (1982), 333.
- (7) 土田・相場, 日本機械学会論文集 (B 編), 56-568 (1993-12), 3899~3905.