

# 上下左右に複数の小孔からなる開口部を有する 水平環状すきま内におかれた円管の沸騰熱伝達

土田 一・菅原友裕\*・山田善之\*

## Heat Transfer in Boiling from Horizontal Tube Enclosed by Concentric Outer Tube with Holes

Hajime TSUCHIDA, Tomohiro SUGAWARA and Yosiyuki YAMADA

(1997年11月28日受理)

An experimental investigation of boiling heat transfer of saturated R-11 has been conducted with a horizontal cylinder which is 20 mm in diameter and 50 mm in length, and is enclosed by concentric outer tube. This outer tube have many holes which are 2 mm~7 mm in diameter( $d'$ ). The clearance ( $c$ ) between these tubes ranged from 0.15 mm to 2.7 mm and heat flux ( $q$ ) from  $1.5 \times 10^3$  to  $1.5 \times 10^5$  W/m<sup>2</sup>. Heat transfer characteristics have been demonstrated and discussed in this report.

### 1. はじめに

近年、省エネルギーさらには熱エネルギーの有効利用が重要視されている。相変化、特に沸騰現象を伴う熱交換器の高性能化及び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ことが最重要課題となっている。従来より、通常の平滑伝熱面に狭い空間を形成した場合、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て向上することが知られている<sup>1)</sup>。しかし、工業用熱交換器の約8割が管胴型で占められているにも関わらず、狭い空間内におかれた水平伝熱管の沸騰熱伝達に関する研究はあまり見受けられない。

このような背景より、既報<sup>2)</sup>では、上下に円管軸と平行な細長い開口部を有する円管（非加熱）内に伝熱管を同心状に取り付け、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て、その伝熱特性について明らかにした。本研究では、伝熱促進と同時に、開口部を有する円管の製作の容易さを考慮に入れ開口部形状を小孔と単純化し、さらに小孔を円周方向上下左右の4箇所を設置し、小孔径および環状すきまをそれぞれ変化させた場合の沸騰熱

特性について実験的に明らかにしようとするものである。

#### 主な使用記号

- A : 伝熱管の有効伝熱面積 [m<sup>2</sup>]
- a : 液体の温度伝導率 [m<sup>2</sup>/sec]
- c : 伝熱管と外側円管との環状すきま [m]
- d : 伝熱管直径 [m]
- d' : 小孔径 [m]
- E : 電流 [V]
- I : 電圧 [A]
- L : 伝熱管の有効伝熱部長さ [m]
- Q : 供給熱量 = E · I
- q : 伝熱面熱流束 = Q/A [W/m<sup>2</sup>]
- q<sub>c</sub> : 限界熱流束 [W/m<sup>2</sup>]
- T<sub>w</sub> : 伝熱管表面温度 [K]
- T<sub>s</sub> : 被加熱流体の飽和温度 [K]
- ΔT<sub>sat</sub> : 過熱度 = T<sub>w</sub> - T<sub>s</sub> [K]

### 2. 実験装置および方法

実験装置は既報<sup>2)</sup>と同一である。供試伝熱管は、外径20 mm、有効伝熱部長さ50mmの銅製で、円管表面を0/4番エメリー紙にて研磨し、内部に埋め込まれたカートリッジヒータにより間接電気加熱で伝熱面熱流束を与えた。管壁には表面から1 mmの位置に

\* 秋田高専卒業生

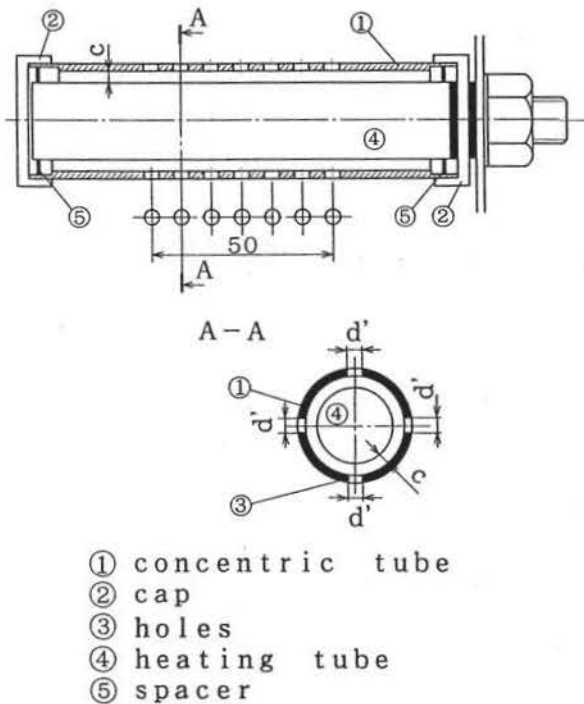


図1 伝熱管と小孔を有する円管との関係

て、軸方向中央部に円周方向上下左右4箇所に銅—コンスタンタン熱電対が ( $\phi 0.2$  mm) が埋め込まれており、これらの平均温度より伝熱管表面温度を算出した。図1は、伝熱面とこれを覆う開口部を有する円管との関係を示す図で、④は伝熱管、①は上下左右に小孔径  $d'$  からなる開口部を設けたアルミニウム製の円管である。伝熱管表面とこの外側円管内面との間には  $c$  のすき間が確保されており、所定の厚みをもつ合成樹脂製のスペーサ⑤により一定に保持できるよう工夫し、すきまゲージにて所定のすきまが得られていることを確認した。実験は、試験液体にフロン系冷媒 R11 を使用し、すきま  $c$  を 0.15, 0.25, 0.35, 0.50, 1.0, 2.7 mm の 6 種類、小孔径  $d'$  を 2, 3, 5, 7 mm の 4 種類に変化させた。伝熱管は沸騰容器底部より 60 mm 上方に位置に設置し、大気圧下・飽和沸騰のもとで行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 沸騰曲線

図2および図3は、小孔径  $d'$  をそれぞれ変化させて得られた沸騰曲線を、環状すきまの狭い  $c = 0.15$  mm と  $c = 0.35$  mm の場合について示したものである。また、図中の実線は  $d' = \infty$  すなわち外側円管がない場合の結果で、西川らの実用簡易式<sup>3)</sup>から求めた計算値とほぼ一致している。なお、図中の一点鎖

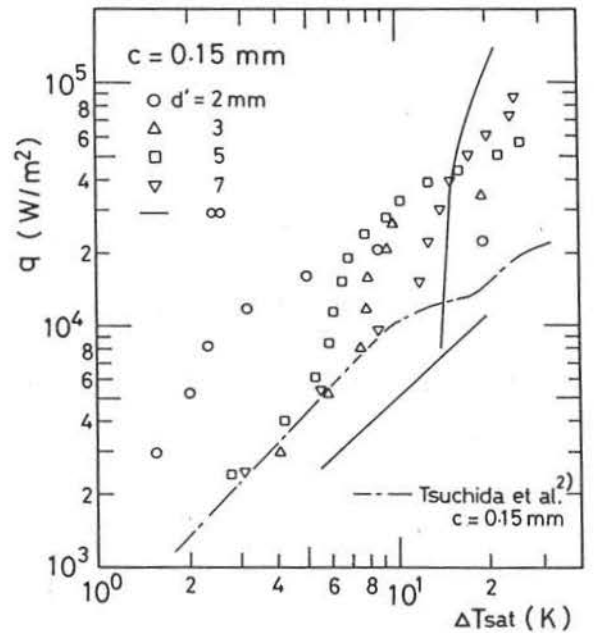


図2 沸騰曲線 ( $c = 0.15$  mm)

線は、上下に円管軸と平行な幅 3 mm の細長い開口部を有する円筒内に直径 20 mm の伝熱管を同心状に設置した場合の結果<sup>2)</sup>である。

図2は、 $c = 0.15$  mm の場合について示したものである。 $d' = 2$  mm が他の場合に比較して、伝熱面熱流束  $q$  が約  $1.6 \times 10^4$  W/m<sup>2</sup> で最も低い過熱度が得られている。図示はしていないが、この場合、発生した蒸気泡は狭いすきま内で押し広げながら、伝熱面全体を覆うように水平方向および上下側開口部から放出されているのが見られた。しかし、 $q$  の増加とともに発生蒸気泡も多くなり、しだいに  $q$  の増加は抑制され過熱度のみが増加し、 $q$  は飽和する。 $d' = 3.5$  mm の場合、その沸騰曲線はほぼ類似しており、特に  $q \leq 0.8 \times 10^4$  W/m<sup>2</sup> では、既存の結果と一致し、 $q$  の増加に対し過熱度の増加が比例している。この場合、蒸気泡のほとんどは水平方向および上側開口部から放出されている。また、 $q \approx 0.8 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^4$  W/m<sup>2</sup> では、発生蒸気泡も多くなり全開口部から放出されるようになることから、 $q$  の増加に伴う過熱度の増加がわずかとなっている。その後は、 $q$  の増加に伴い過熱度も増加し、やがて  $q$  が飽和する。 $d' = 7$  mm の場合、 $q \leq 1.0 \times 10^4$  W/m<sup>2</sup> で既存の結果と一致しているが、 $q \geq 1.0 \times 10^4$  W/m<sup>2</sup> では  $d' = \infty$  とほぼ類似した特性を示すが、 $q$  の増加とともに他の場合と同様に  $q$  の飽和する現象が見られる

図3は、 $c = 0.35$  mm の場合について示したものである。 $q \leq 1.0 \times 10^4$  W/m<sup>2</sup> では、その沸騰曲線は



$d'$ によらずほぼ同一となっているものの、既存の結果と比較して同一熱流束時の過熱度が高くなっている。この場合、蒸気泡は、いずれの  $d'$  においても水平および上開口部から放出され、下開口部からの放出は見られない。 $q \approx 1.0 \times 10^4 \sim 3.0 \times 10^4 \text{ W/m}^2$  では、 $d' = 2, 3, 5 \text{ mm}$  においてそれぞれ過熱度は異なるものの、 $q$  の増加に伴う過熱度の増加はほとんどなく、 $d'$  の小さいほど過熱度が低くなっている。なお、この領域では蒸気泡の比較的周期的な放出による伝熱面の温度変動が観測されている。また、 $d' = 7 \text{ mm}$  の場合は、 $d' = \infty$  とほぼ類似した結果となっている。

### 3. 2 沸騰挙動に関する考察

先に示した沸騰曲線と目視ではあるが沸騰様相の観測をもとに、環状すきまおよび小孔径の大きさの変化による沸騰熱伝達の挙動について考察する。図4および図5は、小孔径  $d'$  がそれぞれ  $2 \text{ mm}$  と  $5 \text{ mm}$  の場合の、すきま  $c$  による過熱度  $\Delta T_{\text{sat}}$  の変化を伝熱面熱流束  $q$  をパラメータにとり示したものである。

$d' = 2 \text{ mm}$  (図4) の場合、 $q \leq 1.5 \times 10^4 \text{ W/m}^2$  において、 $c = 2.7 \sim 0.25 \text{ mm}$  では  $c$  の減少とともに過熱度も徐々に低下し、 $c = 0.15 \text{ mm}$  近傍で最小値を示している。一方、上下に細長い開口部を有する場合は、過熱度の最小値を示す  $c$  は  $0.35 \text{ mm}$  近傍となっており、開口部の形状および配置の相違が明確に現れている。本実験結果の場合、 $c = 1.0 \sim 0.25 \text{ mm}$  では、裸管に比較し伝熱促進はされるものの、過熱度の値にそれほど差異はなく、沸騰様相には大きな変化がないものと考えられる。すなわち、発生蒸気泡がすきま内で合体し水平方向および上側開口部より放出されるため、伝熱管表面近傍に形成されている過熱液層の約上側半分が蒸気泡によりはく脱される。このことから、わずかな伝熱促進にとどまっているものと推察される。しかし、過熱度が最小値となる  $c = 0.15 \text{ mm}$  近傍では、蒸気泡が狭いすきま内を押し広げながら全開口部より放出されるため、伝熱管表面近傍に形成されている過熱液層のほとんどが強制的にはく脱される。その後、開口部より周囲の新鮮液体がすきま内に流入することから、気液交換が最もバランス良く行われているためと考えられる。 $q \approx 3.0 \times 10^4 \text{ W/m}^2$  では、過熱度の最小値が  $c = 0.35 \text{ mm}$  近傍に存在し、その傾向は上下に細長い開口部を有する場合とほぼ同一となっていて、沸騰様相もほぼ類似したものとなっている

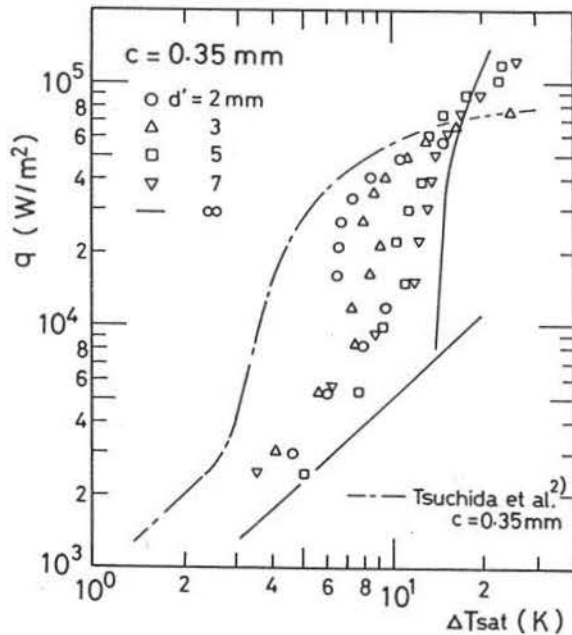


図3 沸騰曲線 ( $c = 0.35 \text{ mm}$ )

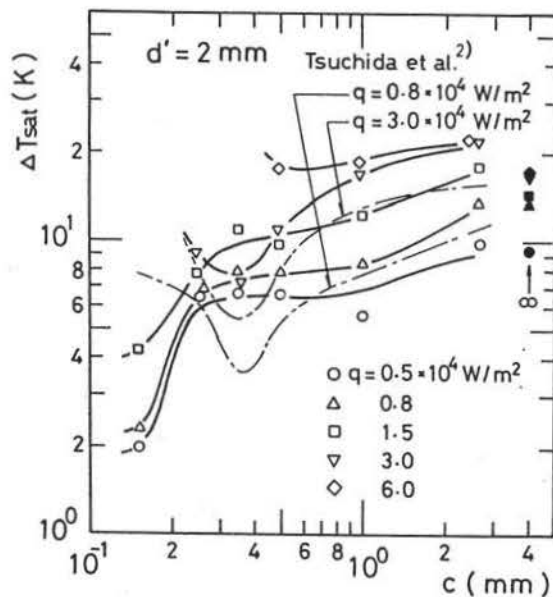


図4 すきま寸法による過熱度の変化 ( $d' = 2 \text{ mm}$ )

と考えられる。しかし、前述したように上下に細長い開口部がある場合は、蒸気泡が伝熱面全体を覆うように上下開口部より放出されるのに対し、本実験の場合、発生蒸気泡は全開口部から放出されるものの、開口部が4箇所にあるためにその近くの小孔より放出され、伝熱面近傍に存在する過熱液層が部分的に残留するため過熱度が高くなっているものと推察される。なお、 $c = 2.7 \text{ mm}$  の場合、裸管に比較し、 $q \geq 3.0 \times 10^4 \text{ W/m}^2$  で過熱度が高くなっており、熱伝達が低下している。これは、小孔径が小さく  $q$  の

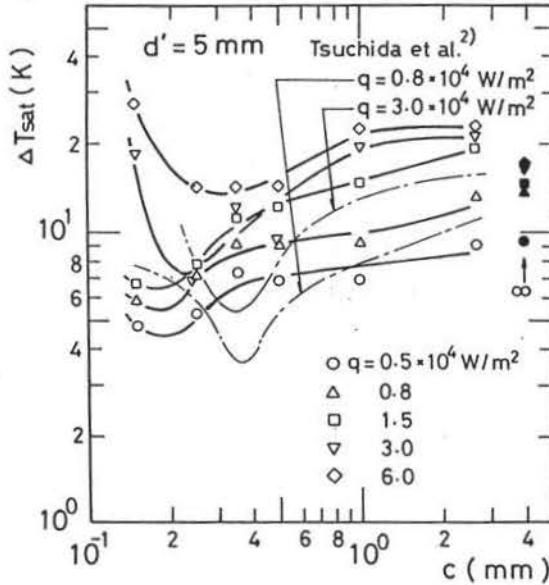


図5 すきま寸法による過熱度の変化 ( $d' = 5 \text{ mm}$ )

増加とともにすきま内の蒸気泡の量も増加するため気液交換がスムーズに行われなくなるためと考えられる。 $q = 6.0 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ では、 $c \geq 0.5 \text{ mm}$ で過熱度の変化は小さくなっている。また、 $c < 0.5 \text{ mm}$ では、すきま内は蒸気泡で覆われ、液体の存在が見られなくなり、急激に伝熱管表面温度が上昇する。

$d' = 5 \text{ mm}$ の場合(図5)、 $q \leq 1.5 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ において、 $d' = 2 \text{ mm}$ の場合とほぼ同様な傾向となっているが、過熱度の最小値を示す $c$ が $0.2 \text{ mm}$ 近傍に存在している。しかし、その過熱度は $d' = 2 \text{ mm}$ に比較し高い値を示している。この場合、 $d'$ が大きくなると伝熱管表面が外側円管内面で覆われる面積が小さくなることから、狭いすきま寸法では流路抵抗が大きく、すきま内を通過する蒸気泡が少なくなるためと考えられる。また、 $q \geq 3.0 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ においても同様な傾向を示しているが、 $q$ の増加とともに過熱度の最小値が $c$ の広い方へと移行している。この領域では、 $c$ が狭いほどすきま内に占める蒸気泡量が多くなり、伝熱面温度が高くなるのもと考えられる。

図6および図7は、すきま $c$ がそれぞれ $0.15 \text{ mm}$ と $0.35 \text{ mm}$ の場合の、小孔径 $d'$ による過熱度 $\Delta T_{\text{sat}}$ の変化を伝熱面熱流束 $q$ をパラメータにとり示したものである。なお、図中にはそれぞれの $q$ に対応する裸管の結果も示した。

$c = 0.15 \text{ mm}$ の場合(図6)、 $q \leq 0.8 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ において、 $d' \geq 3 \text{ mm}$ では $d'$ の減少に伴う過熱度の変化はほとんど見られないが、 $d' = 2 \text{ mm}$ 近傍で急激に過熱度が小さくなっており $d'$ による影響が顕

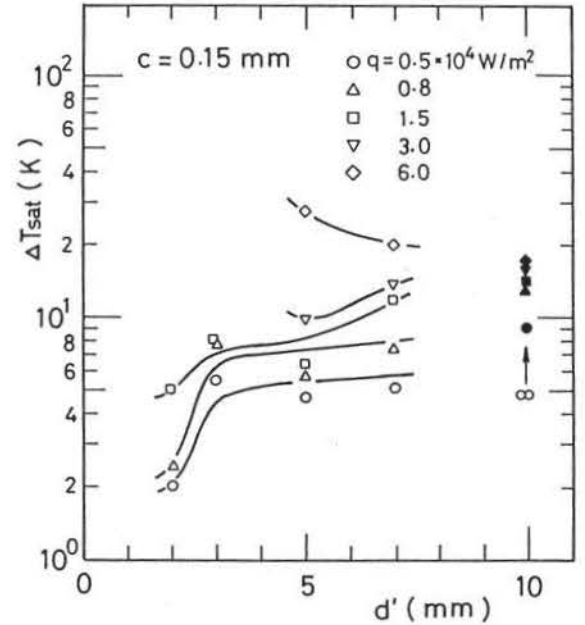


図6 小孔径による過熱度の変化 ( $c = 0.15 \text{ mm}$ )

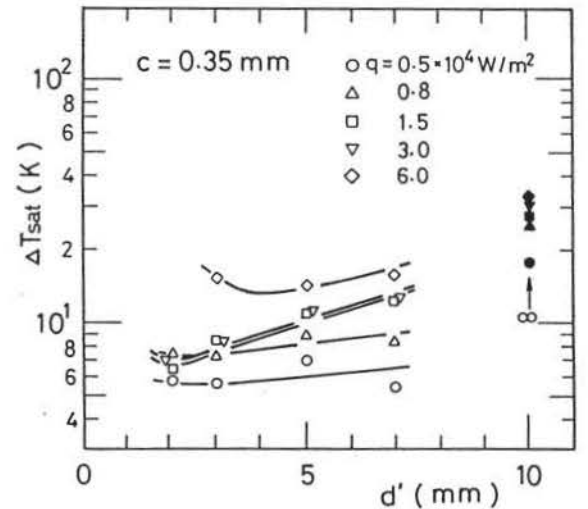


図7 小孔径による過熱度の変化 ( $c = 0.35 \text{ mm}$ )

著に現れている。この場合、同一熱流束時の発生蒸気泡量はほぼ同じであるが、前述のように $c$ および $d'$ が小さいことで、すきま内で押し広げられて通過する蒸気泡量が多いことによるものである。 $q = 1.5 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ では、多少のパラツキはあるものの $d'$ の減少に伴い過熱度も緩やかに減少し、熱伝達が促進される。なお、 $q \geq 3.0 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ では、 $d' \leq 5.0 \text{ mm}$ で過熱度が急上昇し、熱伝達が著しく低下する。

図7は、 $c = 0.35 \text{ mm}$ の場合で、 $q \leq 0.8 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ において $c = 0.15 \text{ mm}$ の場合とは異なり、 $d'$ による過熱度の変化はほとんど見られない。この場



合、 $c$  が若干広くなることで  $d'$  によらず蒸気泡のすきま内における流動がほぼ同一となっているものと考えられる。 $q \approx 1.5 \times 10^4 \sim 3.0 \times 10^4 \text{ W/m}^2$  では、発生蒸気泡量が増加し  $d'$  の減少とともにすきま内の蒸気泡の流動も変化する。すなわち、 $d'$  が比較的大きい場合には蒸気泡が水平および上側開口部から放出されるのに対し、 $d'$  が小さくなるにしたがい下側開口部からも放出されることから、前述のごとく伝熱面近傍に形成されている過熱液層がはく脱される割合が  $d'$  の小さいほど多いためと考えられる。なお、 $c$  の増加に伴い  $d'$  の影響はほとんど見られなくなる。

### 3.3 限界熱流束

図2および図3で示した沸騰曲線において、すきま  $c$  と小孔径  $d'$  の組み合わせにより異なるが、沸騰空間が激しい沸騰により蒸気で満たされ、周囲の液体がすきま内に流入できず伝熱管表面温度のみが増加する現象が生じている。本実験では、熱流束がある値で飽和し伝熱面温度のみが増加する熱流束を限界熱流束  $q_c$  と定義し、この限界熱流束とすきまの関係について、パラメータに小孔径  $d'$  をとり図8に示した。いずれの  $d'$  においても、すきま寸法の減少に伴い  $q_c$  の値もほぼ直線的に低下する。また、 $d'$  の減少とともに  $q_c$  も低下している。なお、 $d' = 2 \text{ mm}$  の場合、上下に幅  $3 \text{ mm}$  の細長い開口部を有する場合の結果とほぼ同様の傾向を示しており、 $c < 0.35 \text{ mm}$  で  $q_c$  の低下の度合いが大きくなっている。

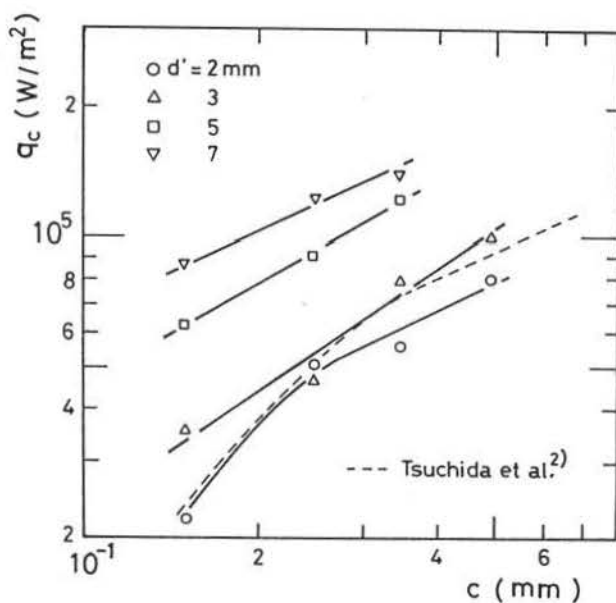


図8 すきま寸法による限界熱流束の変化

### 4. まとめ

狭いすきま内におかれた水平円管の沸騰熱伝達に関して、上下左右に複数の小孔からなる開口部を有する円管内に伝熱管を同心状に取り付け、2円管で構成される環状すきまおよび小孔径を変化させた場合について、被加熱流体に 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) 小孔径が  $2 \text{ mm}$  の場合、伝熱面熱流束が約  $1.5 \times 10^4 \text{ W/m}^2$  以下、環状すきまが  $2.7 \sim 0.35 \text{ mm}$  ではすきま寸法の減少とともに過熱度も徐々に低下し、すきま寸法が  $0.15 \text{ mm}$  近傍で最小値を示す。また、伝熱面熱流束が  $3.0 \times 10^4 \text{ W/m}^2$  近傍では、過熱度の最小値を示すすきま寸法が  $0.35 \text{ mm}$  近傍に存在し、上下に円管軸と平行な幅  $3 \text{ mm}$  の細長い開口部を有する場合の結果とほぼ同様の傾向を示すが、熱伝達はそれより低下する。

(2) 小孔径が  $5 \text{ mm}$  の場合、伝熱面熱流束が約  $1.5 \times 10^4 \text{ W/m}^2$  以下において、小孔径  $2 \text{ mm}$  の場合とほぼ同様の傾向を示すが、過熱度の最小値を示すすきま寸法は  $0.2 \text{ mm}$  近傍とすきまの広い方へと移行している。しかし、その熱伝達は小孔径  $2 \text{ mm}$  の場合よりも劣る。

(3) 伝熱面熱流束が約  $0.8 \times 10^4 \text{ W/m}^2$  以下の低熱流束域において、すきま寸法が  $0.15 \sim 0.2 \text{ mm}$  近傍の極めて狭い、しかも小孔径も  $3 \text{ mm}$  以下の小さい領域で伝熱促進が顕著である。

(4) 環状すきまが  $0.5 \text{ mm}$  以下で、いずれの小孔径においても、すきま内の液体不足から生ずる限界熱流束が存在し、すきま寸法および小孔径が小さくなるほど低熱流束で現れる。

### 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) 土田・相場, 日本機械学会論文集 (B編), 59-568 (1993), 3899.
- 3) 西川・ほか3名, 日本冷凍協会誌, 53-607 (1978), 389.